



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y**  
**COMPUTACIÓN**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN HORNO PARA SECADO DE  
MADERA, DIRIGIDO A PYMES DEL SECTOR MADERA  
MUEBLE DEL MUNICIPIO DE MANAGUA”.**

**Autores:**

**Br. Hayner Alonso Ortega Zelaya.**

**Br. José Antonio Reyes Canales.**

**Managua 08 de agosto del 2018**

## **DEDICATORIA**

A nuestro padre celestial por darnos el don de la vida y permitirnos finalizar este trabajo monográfico.

A nuestros Padres por ser nuestro ejemplo de superación, quienes a lo largo de nuestra vida nos han guiado y apoyado con su cariño y compromiso hacia nosotros.

A nuestro tutor por su apoyo incondicional, en el desarrollo de este trabajo monográfico.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecemos eternamente a Dios por que nos regaló la vida, voluntad y fortaleza para culminar nuestros estudios.*

*A nuestros padres por su apoyo incondicional a lo largo de nuestra vida.*

*De igual manera le agradecemos a nuestro Tutor por ser nuestro guía y amigo en el desarrollo de este trabajo monográfico y ser una persona interesada en aportarnos sus conocimientos para el desarrollo investigativo de este trabajo.*

*A los gerentes y encargados de las diferentes áreas del Programa Institucional de la madera, por permitirnos realizar este trabajo monográfico en sus instalaciones.*

*A todos nuestros compañeros y amigos por su apoyo incondicional y que estuvieron con nosotros en el arduo pero provechoso estudio para la realización de este Trabajo Monográfico.*

## Índice general

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Antecedente.....	4
Justificación.....	5
Marco teórico.....	6
Importancia del Sector Madera en Nicaragua.....	6
Tipos de Hornos Usados en el secado de madera.....	7
Hornos de Combustión.....	7
Hornos eléctricos.....	7
Hornos Solares.....	7
Ventajas de un horno solar ante los otros hornos.....	8
Desventajas de los Hornos Solares ante los otros hornos.....	8
Tipos de radiación Solar.....	8
Radiación directa.....	8
Radiación difusa.....	8
Radiación Solar en la región.....	8
Contenido de humedad de la madera.....	9
Secado de la madera.....	10
Posición de Horno solar.....	10
Tamaño y capacidad del horno solar.....	11
Aislamiento térmico.....	11
Componentes básicos de la secadora.....	12
Relación Humedad del aire y la humedad de la madera.....	12
Velocidad del aire.....	12
Convección.....	13
Convección natural.....	13
Convección forzada.....	13
La temperatura.....	13
Cómo funcionan los hornos solares.....	15
Cómo funcionan los hornos convencionales.....	16
Cómo funcionan los hornos al vacío.....	16
Cómo funcionan los hornos de des humidificación.....	17
Elementos del secado.....	19
Aprovechamiento de la energía solar.....	20
Térmica.....	20
Fotovoltaica.....	20
Secado solar.....	20
Principios del secado de la madera.....	21
La constante solar.....	22
El efecto invernadero.....	22
El Aislamiento Térmico.....	23
Presión de vapor.....	24
Calor latente de vaporización.....	24
Características de la madera.....	25
Propiedades de la madera.....	25

Anisotropía.....	26
Higroscopia.....	26
Agua de desorción.....	26
Agua de condensación o capilar .....	26
Agua libre.....	26
La madera y el agua.....	27
La relación entre el agua y la madera funciona de la siguiente forma.....	27
Anisotropía.....	29
Densidad o peso específico.....	30
resistencia mecánica.....	30
Dureza.....	30
Otras características.....	31
Propiedades térmicas.....	31
Propiedades eléctricas.....	31
Propiedades acústicas.....	31
La transferencia de calor.....	31
Determinación del aislante adecuado para el secador.....	34
Lana de vidrio.....	34
Espuma de poliuretano.....	34
Poliestireno.....	35
Lana mineral.....	35
Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con la madera.....	41
Albura y Duramen.....	41
Anillos de Crecimientos.....	41
Radios.....	41
Grano y Textura.....	41
Color.....	42
Variaciones en la Estructura.....	42
Densidad y Peso Específico.....	42
Dimensiones de la Madera.....	43
Estado Fitosanitario.....	43
Contenido de Humedad inicial (CHI).....	43
Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con las variables del proceso .....	44
Temperatura.....	44
Humedad Relativa (HR).....	45
Velocidad del aire.....	46
La humedad en la madera.....	47
Determinación del Contenido de Humedad de la Madera.....	48
Cálculo de contenido de humedad. ....	50
Muestras para el control del secado.....	51
Control Manual .....	51
Determinación del Contenido de Humedad y del Peso Seco al Horno de las Muestras .....	52
Colocación de las Muestras de Secado en las Pilas.....	53
El Uso de las Muestras Testigo Durante el Secado .....	53
Diseño y funcionamiento del horno de secado solar.....	57
Diseño y funcionamiento del horno de secado solar.....	57
Posición de la secadora solar.....	58
Tamaño y capacidad del secador solar.....	58
Sistema de aislamiento.....	59
componentes básicos del horno secador.....	60

Colector.....	60
Ventiladores .....	61
Ventilas.....	62
Materiales de construcción.....	62
Cimientos.....	63
Paredes de puertas y ventanas .....	63
Techo.....	63
Colector.....	64
Ventiladores .....	64
Modelo construido de secado solar de madera.....	64
Cimientos.....	65
Refuerzos en boquetes de puertas y ventanas.....	68
Alineación y aplomado de los paneles: .....	68
Techo.....	69
Construcción del Horno para secado de madera.....	72
Ensayos para análisis de funcionamiento. ....	72
análisis de resultados. ....	73
Hipótesis.....	75
Variables físicas inmersas en el proceso de secado.....	75
Temperatura.....	75
Humedad relativa del aire.....	75
Diseño metodológico.....	76
Tipo de Investigación/Universo/Muestra.....	76
El universo.....	76
La muestra.....	76
Variables a investigar.....	76
Recopilación de información de fuentes secundarias. ....	76
Levantamiento de información primaria.....	77
Construcción del Horno Solar.....	77
Ubicación del horno dentro del recinto.....	78
Procesamiento de información.....	78
Conclusiones .....	79
Recomendaciones.....	80
Referencias bibliográficas.....	81
Anexos.....	83

## **Índice de figuras**

- Figura # 1: Esquema general de un horno de secado de madera**
- Figura # 2: Principales direcciones de la madera, fuente: Anisotropía**
- Figura #4. Principio general de un secador solar para madera**
- Figura #5: Secadora solar con capacidad máxima de 27 m<sup>3</sup>**
- Figura #6: Vista de Cimentación del horno**
- Figura #7: Elevación estructural lado A**
- Figura #8: Elevación estructural lado B**
- Figura #8.1 Elevación estructural vista trasera**
- Figura #8.2 Elevación estructural vista frontal**
- Figura #8.3: Sección de columnas y vigas**
- Figura #8.4: Vista superior del techo**
- Figura #8.5: Vista superior del techo instalado**
- Figura #8.6: Vista del horno con muro de retención perimetral**
- Figura #9: Muestras de madera de Pino, Cedro Real y Guapinol**
- Figura #9.1: Resultados obtenidos de las muestras de madera**
- Figura #9.2 Resultados obtenidos de las muestras de madera utilizadas**
- Figura #10: Detalle del descapote, nivelación y zanjeo de la cimentación horno PIMA**
- Figura #10.1: Detalle de las zapatas, vigas, llorones y malla sísmica del horno PIMA**
- Figura #10.2: Detalle de muro de concreto reforzado y anclajes para horno PIMA**
- Figura #10.3: Montaje de anclaje para horno PIMA**
- Figura #10.4: Técnica de dimensionamiento en láminas ISOPANEL-HOPSA**
- Figura #10.5: Instalación de canaletas sobre para lamina ISOPANEL-HOPSA**
- Figura #10.6: Corte de lámina ISOPANEL-HOPSA en las instalaciones PIMA**
- Figura #10.7: Detalle colocación de pegamento Sikaflex**

## Resumen

En el presente documento se presentan los aspectos más importantes que deben ser considerados en la construcción de un secador solar para madera aserrada. Se detallan aspectos de diseño de cimientos, paredes, puertas, techo, colector, equipamiento y una recomendación de los materiales por utilizar. Se incluye un prototipo de secadora solar, que ha sido construido por el Programa Institucional de la madera (PIMA) el cual está ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería, Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios.

se desarrolla los diferentes objetivos del estudio propuesto se plantea el aprovechamiento de la energía solar Térmica., Fotovoltaica. Además de explicar el Principios del secado de la madera y tipos de hornos solares Se menciona la clasificación de los diferentes tipos de hornos de acuerdo la a técnica operacional, Hornos continuos (progresivos), Clasificación de acuerdo a su temperatura Y finalizando por la Clasificación respecto a la fuente energética.

se menciona el principio de funcionamiento del horno solar además de la función del efecto invernadero se estudian los diferentes tipos de radiación solar que sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera. Igualmente se aclara la forma de calentamiento solar. tales como Calor latente de vaporización y se finaliza analizando las características y propiedades de la madera; así como la relación entre el agua y la madera entre otras características.

se examino La determinación de la transferencia de calor, Conducción, Convección y Radiación además Se analizará diferentes aislantes térmicos (Lana de Vidrio, Espuma de Poliuretano, Poliestireno y Lana Mineral) en base a sus propiedades de conductividad térmica, densidad, su temperatura de operación, haciendo comparaciones entre ellos para determinar el aislante óptimo para el horno de secado.

se evaluaron los Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con la estructura de la madera (Albura y Duramen, Anillos de Crecimientos, Radios, Grano, Textura y color.



## **Introducción**

Es muy importante para las Pymes del sector madera en Nicaragua, aumentar el valor agregado del recurso maderable, sin embargo, uno de los principales problemas para este propósito, es el secado de la madera de manera que sea posible fabricar productos de calidad en función de un contenido de humedad óptimo. El secado que tradicionalmente llevan a cabo las Pymes del sector madera-mueble es al aire libre, esto expone la madera directamente a los rayos solares, provocando defectos en la madera tales como decoloración y grietas (Es necesario remover esta capa de madera antes de ser aprovechada). La madera que no es secada adecuadamente y bajo condiciones controladas, presenta defectos durante y después de ser procesada, que luego se verán reflejados como pérdidas económicas.

Una de las alternativas utilizada a nivel mundial para el proceso de secado son los Hornos convencionales, pero los elevados costos en infraestructura, operación y la poca disponibilidad de mano de obra calificada; limitan a las pymes del sector madera el acceso a esta tecnología, convirtiendo al horno solar como una alternativa de menor costo sin afectar la calidad resultante del proceso de secado.

Ante la necesidad de secar la madera surgió la idea de proponer un diseño de un horno solar que permita a las PYMES nicaragüenses de este sector aprovechar la energía solar disponible en el país para solucionar el problema del secado; Con esta propuesta se reducirán las pérdidas causadas por un secado inadecuado, permitiendo que el secado de madera sea de mayor eficiencia y eficacia.

Esta propuesta tiene gran impacto socioeconómico en nuestro país ya que el diseño cumplirá con los estándares de calidad de hornos solares, además de esto su construcción se lleva a cabo en corto tiempo y los materiales se encuentran en el mercado local, de esta manera abaratan y agilizan la construcción del mismo.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

1. Diseñar y construir un horno solar para el secado de madera.

### **Objetivos específicos**

1. Proponer un diseño constructivo de un horno solar para el secado de la madera, tomando en cuenta estudios previos sobre esta tecnología en la región.
2. Construir un horno solar para el secado de madera en las instalaciones del Programa Institucional de la Madera en la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua.
3. Analizar los factores relevantes que afecten la pérdida de humedad relacionados con la infraestructura de la madera y las variables consideradas en el proceso de secado.

## **Antecedente**

Como antecedente del presente trabajo se encuentra el trabajo titulado “Diseño y construcción de un secador solar para madera” de la revista forestal Kuru (Costa Rica) 5 (14), 2008; El cual propone un diseño de horno solar para secar madera mediante el aprovechamiento de la energía solar, pero que su diseño está limitado a trabajar con las condiciones climatológicas presentes en el vecino país y con los materiales disponibles en el mercado local.

En el año 2016 se realizó un horno solar a escala en la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua, el cual ha dado resultados importantes y positivos para el desarrollo del horno solar a escala natural. Analizándose los parámetros principales involucrados en el proceso de secado, utilizando muestras de tres especies de madera (Pino, Cedro y Guapinol) presente en el mercado maderable de Nicaragua.

Finalmente se espera que este proyecto se desarrolle en las pequeñas y medianas empresas del sector madera del municipio de Managua luego se expanda a todo del país, dando así una solución limpia al problema del secado de madera y evitando así pérdidas económicas resultantes de un mal proceso de secado.

## **Justificación**

Las Pymes del sector maderable tienen la necesidad de secar la madera antes de procesarla, esto se convierte en un problema por no tener una tecnología adecuada para llevar a cabo una de las etapas más importantes en este tipo de industria a como lo es el secado.

Tradicionalmente la madera es secada al aire libre mediante la exposición directa a la radiación solar, pero esto afecta la calidad de la madera y produce perdidas innecesarias en el proceso, es por eso que se han desarrollado una variedad de hornos convencionales que funcionan a base de energías no renovables (Gas licuado, energía eléctrica, etc.) pero que implican elevados costos de construcción y operación, convirtiendo al horno solar como una alternativa de menor costo, sin disminuir la calidad del producto resultante en el proceso.

## **Marco teórico**

Diseñar un horno solar para el secado de madera consiste en varios procesos que tienen como finalidad obtener un producto que cumpla con las condiciones óptimas de operación de acuerdo a la posición geográfica en el cual valla a ser utilizado. Unos de los eslabones principales en la cadena productiva del sector madera es el secado de la misma, la madera recién aserrada no puede ser procesada sin antes someterse a un proceso de secado.

Hoy en día existen diferentes métodos y herramientas que las PYMES (1) de este sector utilizan para llevar a cabo este indispensable proceso. Existe Hornos Convencionales para el secado de madera, que conllevan altos costos de construcción, operación y mantenimiento.

## **Importancia del Sector Madera en Nicaragua.**

Nicaragua es un importador neto de productos derivados de la madera especialmente papel y cartón. En estas exportaciones los rubros dominantes son, madera en trozas y aserrada y un valor menor en muebles de madera y artesanías.

Según el Informe anual que emite el Banco Central de Nicaragua el sector madera ha aportado al producto Interno Bruto 2,524.5 millones de córdobas en el año 2013; 2,705.3 millones de córdobas en el año 2014 y 3,137.7 millones de córdobas para el año 2015. Presentando tasas de crecimiento anual reales de 1.2, 3.1 y 2.7 respectivamente.

## **Horno.**

Es un dispositivo que puede generar calor y mantenerlo dentro de un compartimento cerrado. Puede ser utilizado tanto para calentar o secar variedad de productos presentes en la industria.

La energía calorífica utilizada para alimentar un horno puede obtenerse directamente por combustión (leña, gas u otro combustible), radiación (luz solar), o indirectamente por medio de electricidad (horno eléctrico).

## **Tipos de Hornos Usados en el secado de madera.**

Los hornos utilizados en el proceso de secado de madera se pueden clasificar según la fuente de energía que estos utilizan para llevar a cabo el secado.

- **Hornos de Combustión:** Son cámaras cerradas construidas generalmente de metal, en las cuales se quema un combustible (gas, derivados del petróleo, carbón, etc.) para generar calor y mantenerlo dentro del mismo. Su construcción es un proceso muy complejo y están disponibles en el mercado a un alto costo, generalmente usados en los procesos industriales.
- **Hornos eléctricos:** A diferencia de los hornos de combustión, estos utilizan energía eléctrica para calentar resistencias las cuales calientan por convección y radiación el interior de la cámara de secado. Estas no emiten gases contaminantes a la atmosfera dado que no se quema un combustible en la misma, haciéndolos ideales para funcionar en espacios cerrados, pero tienen altos costos de operación.
- **Hornos Solares:** Los hornos solares son cámaras o compartimientos cerrados de pared aislante y tienen la capacidad de operar con energía totalmente limpia ya que trabaja solamente con la radiación proveniente del sol sobre la superficie de la tierra.

Los hornos solares retienen el calor proveniente de la radiación solar dentro de la cámara de secado, que es el espacio comprendido entre sus paredes, techo y la base de concreto o loza de concreto.

Las secadoras solares a pesar de que son muy simples en cuanto a diseño y funcionamiento, permiten y a la vez requieren de algún grado de control de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa.

➤ **Ventajas de un horno solar ante los otros hornos.**

- Menor costo de construcción.
- Materiales de fácil acceso para su construcción.
- Bajos costos de operación.
- No hay emisiones de gases contaminantes a la atmosfera.
- Pueden ser utilizados en zonas aisladas y de difícil acceso.

➤ **Desventajas de los Hornos Solares ante los otros hornos.**

- Dependen de las condiciones climatológicas.
- Su eficiencia disminuye durante en el invierno y durante la noche.
- Su eficiencia disminuye cuando aumenta el volumen a secar.

**Tipos de radiación Solar.**

Se conoce como radiación solar al flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta), se mide normalmente con un instrumento denominado pirómetro en unidades de kilovatios por metro cuadrado.

**Radiación directa:** La radiación que recibe directamente del sol, sin sufrir ninguna dispersión Atmosférica. La radiación extraterrestre es por tanto radiación directa.

**Radiación difusa:** Es la que se recibe del sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es la radiación difusa la que recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa el cielo se vería negro aun de día como sucede por ejemplo con la luna.

**Radiación Solar en la región.**

El municipio de Managua está ubicado entre las latitudes de 11°46'37" norte y 12°38'22" Norte, y entre las longitudes de 85°53'22" oeste y 86°41'00" oeste. Los

valores de latitud nos definen el ángulo de inclinación del techo del horno solar que es de 12°, para que los rayos solares penetren en el mismo con la mayor perpendicularidad posible.

La energía solar pasa a través del techo de vidrio utilizando la onda corta y una vez que lo atraviesa la energía no puede escapar ya que se refleja en forma de onda larga, la cual queda atrapada en la cámara y produce un efecto invernadero a lo interno de la cámara.

### **Contenido de humedad de la madera.**

La madera contiene agua bajo tres formas: agua libre, agua higroscópica y agua de constitución. El agua libre se encuentra llenando las cavidades celulares. El agua higroscópica se halla contenida en las paredes celulares. El agua de constitución se encuentra formando parte importante de la estructura molecular.

Cuando se expone la madera al medio ambiente, empieza a perder agua iniciándose el proceso de secado, en el transcurso del secado se pierde primero el agua libre y después el agua higroscópica, el agua en constitución no se pierde sino por combustión de la madera.

En función de la cantidad de agua que contenga la madera pueden presentarse tres estados: verde, seco y anhidro. Se dice que la madera esta verde cuando ha perdido parte del agua libre, será madera seca cuando ha perdido la totalidad del agua libre y parte del agua higroscópica, finalmente será madera anhidra cuando ha perdido toda el agua libre y toda el agua higroscópica.

El contenido de humedad (CH) es el porcentaje en peso, que tiene el agua libre más el agua higroscópica con respecto de la madera anhidra. Para una muestra de madera el CH será:

$$CH\% = (\text{peso húmedo} - \text{peso anhidro} / \text{peso anhidro}) * 100$$



Existen dos valores del CH que son particularmente importantes, al primero se le llama punto de saturación de las fibras (PSF) y el CH que tiene la madera cuando ha perdido la totalidad del agua libre y comienza a perder el agua higroscópica. Al segundo CH contenido de humedad de equilibrio (CHE) cuando la madera expuesta al aire, pierde parte del agua higroscópica hasta alcanzar un CH en equilibrio con la humedad relativa del aire.

### **Secado de la madera.**

El proceso de eliminación del agua en exceso del material recién cortado, que se aplica con el propósito de optimizar su posterior procesamiento y transporte para usos específicos. La madera puede ser secada por uno de los tres métodos siguientes:

- Secado completo al aire libre (secado natural).
- Secado completo en hornos o cámaras.
- Secado al aire hasta cerca del punto de saturación de las fibras y completando el proceso en un horno.

El agua en la madera está presente en dos formas: agua libre o capilar, que se encuentra en el interior de las cavidades celulares. Es el agua de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas del leño y se llega a un nivel de humedad de aproximadamente 30% en la madera. A este contenido de humedad se denomina Punto de Saturación de la Fibras (PSF).

### **Posición de Horno solar.**

La posición de un horno solar depende de la incidencia de los rayos solares. Por ello, en primera instancia deben orientarse de norte a sur. La caída o inclinación del techo, debe ser hacia el sur, de tal forma que se asegure la incidencia de los rayos

solares lo más perpendicularmente posible, a lo largo del año. El grado de inclinación va a corresponder con la latitud del país.

Es la inclinación que se utilizara para la mayor captación de calor. Esta inclinación permite que la variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares en las diferentes épocas del año, no afecte la eficiencia en la captación de la energía sobre el techo y el colector de la secadora.

### **Tamaño y capacidad del horno solar**

Cuando se diseña y construye un horno solar, hay que considerar que el tamaño óptimo de la cámara está en función de la demanda de volumen de madera seca que requiere determinada industria.

Otro aspecto a considerar es el ancho de la secadora. El diseño debe garantizar una uniformidad en la circulación de la masa de aire a través de la pila de madera que se pretende secar.

Es por ello que se recomienda que las secadoras no superen los 5 m de ancho. Una secadora que tenga 3.5 m de ancho y 3.5 m de largo con una altura máxima de 3 m permite apilar una carga de madera de  $6.6 \text{ m}^3$

### **Aislamiento térmico.**

Al diseñar y construir una secadora solar, es de fundamental importancia evitar al máximo la pérdida de calor. Mantener la temperatura a lo interno de la cámara, es vital para acelerar el proceso de secado y llevar la madera a contenidos de humedad que no se logran con un secado al aire libre.

El objetivo del aislamiento del calor es lograr la máxima diferencia entre la temperatura interna de la cámara y la temperatura ambiental. Para ello, la selección de materiales para el techo y paredes es fundamental. Expertos indican sobre este

aspecto, que la selección de materiales debe garantizar que la diferencia mínima entre las temperaturas externas e internas sea de al menos de 10°C.

El techo debe construirse con un material transparente. Entre los que tienen esa propiedad, el vidrio es el que mejores resultados brinda. En el caso de las paredes, se puede usar madera, block, ladrillo, hierro galvanizado o esmaltado, etc. Cuando la estructura de las paredes es construida con madera, hierro galvanizado o esmaltado, el aislante térmico interno es de gran importancia pues se requiere evitar la fuga de la temperatura

### **Componentes básicos de la secadora**

El diseño de una secadora solar debe incluir al menos cuatro componentes: techo, colector, ventiladores y ventilas. Cada uno de estos contribuye a asegurar un funcionamiento adecuado y garantiza Denominación de la madera de acuerdo a su (CH)

### **Relación Humedad del aire y la humedad de la madera.**

La humedad relativa del aire influye o afecta directamente la humedad de la madera. Si la humedad relativa del aire aumenta, entonces aumenta la humedad de la madera inversamente, la humedad de la madera disminuye cuando la humedad relativa del aire disminuye.

Esta aseveración se cumple cuando se mantiene la temperatura constante y cuando los procesos se llevan a cabo en un sistema cerrado como es el caso de un acamara secadora de madera.

### **Velocidad del aire**

El aire circundante dentro del horno es muy importante por dos razones: la primera, debido a que forma un medio de transferencia de calor por convección, que ayuda a la evaporación del agua, en la madera además permite eliminar el exceso de

humedad y mantener las condiciones deseadas. Según la junta de acuerdo de Cartagena 1989, se ha demostrado experimentalmente, que se obtienen condiciones óptimas de secado, en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula a través de la pila a una velocidad de 2 m/s.

## **Convección**

La convección es un término que se usa para describir la transferencia de calor desde una superficie a un fluido en movimiento. En contraposición con la conducción, en la convección existen dos tipos de transferencia de calor que son:

**Convección natural:** La fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensoriales, El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia motriz exterior.

**Convección forzada:** Tiene lugar cuando una fuerza motriz mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura

## **La temperatura**

El aumento de la temperatura logra un aumento en la energía cinética de las moléculas del agua y derivado de ese aumento se logra un aumento en la presión parcial de vapor de agua, mismo que, si supera la presión parcial dentro de la pieza de madera, se produce el fenómeno de evaporación.

Esta se puede leer con una escala de diferencia, que en este caso se utilizara los grados Celsius (°C), cuyo cero corresponde a la temperatura de fusión del hielo, y

los grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ), cuyo origen es el cero absoluto. Esta escala expresa un real sentido físico. Representado en  $^{\circ}\text{K}$ , La temperatura representa el potencial termodinámico.

Secado al aire se refiere al secado que ocurre usando solo el viento natural La madera es apilada sobre separadores y colocada en una manera que permita que los vientos predominantes soplen a través de la madera y la sequen. Según Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 2008, el secado depende estrictamente del clima, que puede secarla demasiado rápida causando daños, o secarla demasiado lenta, igualmente causando pérdidas. Para la manufacturación de productos derivados como muebles se requiere que la madera tenga un contenido de humedad de 6–8%; y generalmente el secado al aire no es suficiente para alcanzar este porcentaje. El secado al aire a menudo es utilizado como un primer paso, para después colocar la madera en un horno para el secado de final. El secado al aire conlleva serios problemas con daños y degradaciones y justamente debido a esto resulta serla manera más cara de secar debido a las pérdidas y degradaciones.

Secado bajo cobertizo es secar la madera protegida de la lluvia y del sol directo que puede dañar la severamente cuando está secando al aire libre. Implica colocar la madera bajo un techo o cobertizo para protegerlo de los elementos climáticos. Esto aumenta en algo la calidad del secado al aire, pero extiende el tiempo de secado. También requiere una inversión en la construcción del cobertizo y aun no permite control sobre los otros factores como la humedad, flujo de aire, y temperaturas.

Secado por aire forzado o ventilado/ secado en cobertizo esto es secar bajo cobertizo como esta descrito arriba, pero usando adicionalmente ventiladores para forzar que aire fluya a través de la madera en lugar de fiarse del viento natural. Esto es más rápido que el secado al aire o secado simple bajo cobertizo, pero los costos de operar los ventiladores son más altos que los beneficios logrados. También, la inversión de capital es mayor a la cantidad de secado que puede ser lograr.

El pre-secado es utilizado para extraer la mayor parte del agua suelta de la madera antes de que esta sea colocada en un horno para el secado final. En un pre-secador,

la madera es apilada dentro de una estructura donde el calor y humedad son controlados. Según Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 2008, La temperatura es mantenida generalmente alrededor de 90-100°F (35°C). La madera es secada con un contenido de humedad de entre 20-30%, y después colocada en un horno para el secado final. Sin embargo, los costos de construcción de un pre-secador son casi los mismos que de un horno, y cuando se compara costos en base a su producción anual, cuesta más operar un pre-secador que un horno de secado, pues el pre-secador requiere manipuleo adicional de la madera. Generalmente los pre-secadores sólo son utilizados en combinación con hornos de secado que son viejos o ineficaces y que no pueden ser usados para secar madera verde.

En un secado al horno, la madera es colocada dentro de una cámara donde el flujo de aire, temperatura, y humedad son controladas para proporcionar un secado tan rápido como pueda ser tolerado por la madera sin causar defectos mayores. Hay varios tipos de hornos de secado. Los diferentes tipos son definidos por la manera en la cual la temperatura y la humedad son controladas. Los tres tipos más comunes son los Hornos Convencionales, los Hornos de Des humidificación, los Hornos al vacío, y los Hornos Solares

### **Cómo funcionan los hornos solares**

Hay varios tipos de hornos solares, pero todos dependen de algún tipo de colector solar para proporcionar energía en forma de calor, para evaporar el agua de la madera. Según Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 2008, El tiempo de secado en los hornos solares depende del clima, por consiguiente, es imprevisible. En climas calientes pueden degradar la madera debido al secado excesivo. En climas más fríos son lentos e inconstantes. Los hornos solares a menudo utilizan ventiladores que requieren electricidad para hacer circular aire por la madera, pero los costos de operar estos ventiladores terminan siendo altos—por causa del largo tiempo que tienen que funcionar para secar la madera, haciendo que el secado solar resulte caro. La electricidad que se usa para operarlos ventiladores en un horno solar es generalmente más de lo que se usaría operando un Horno Deshumidificador por la diferencia en el tiempo de secado. Cuando se tiene que extraer una cierta cantidad

de agua de una cierta cantidad de madera, se necesita una cierta cantidad de calor total para hacerlo, y ese requisito de calor no puede cambiarse. En el secado de madera no es posible reducir los requerimientos de calor al punto donde el calor solar pueda ser competitivo

### **Cómo funcionan los hornos convencionales**

Para calentar la cámara de secado y extraer el agua de la madera, los hornos convencionales utilizan el calor proporcionado por serpentinas de vapor, agua caliente o aceite, o el calor directo de un quemador sea de petróleo, gas natural, o desperdicios de biomasa. El calor que se genera calienta el aire para extraer el agua de la madera por evaporación, una vez saturado de vapor, el aire caliente es desfogado a través de toberas, absorbiendo al mismo tiempo aire externo que es nuevamente calentado a la temperatura que pueda extraer agua de la madera para repetir este proceso de nuevo. Por consiguiente, los hornos convencionales no son tan eficientes de energía como los hornos de des humidificación pues requieren un constante recalentamiento de aire a un costo alto de energía. Por ejemplo, para extraer una libra de agua (de la madera), un horno convencional tiene que absorber cerca de 400 pies cúbicos de aire (12 m<sup>3</sup>) calentar ese aire y luego expulsarlo con el agua evaporada. Entre calentar estas grandes cantidades de aire y calentar el agua para evaporarla, los hornos convencionales continuamente utilizan bastante energía. Pueden proporcionar una calidad muy buena de madera si son suministrados con un método de control bueno, pero su consumo total de energía es mucho más alto que de un horno de des humidificación.

### **Cómo funcionan los hornos al vacío**

Cuando la madera es colocada en un horno al vacío, el agua hierve rápidamente. Según Vargas, A. Y Montealegre (1998), los hornos al vacío se valen de este hecho para secar madera en sólo una fracción del tiempo comparado a hornos convencionales o de des humidificación. Sin embargo, una desventaja mayor de estos hornos es que las cámaras de secado son pequeñas, y no pueden secar grandes cantidades de madera en un solo ciclo. En un horno al vacío es necesario

proporcionar continuamente calor a la madera. Para hacer esto, algunos sistemas utilizan mantas eléctricas en contacto

Con cada pieza de madera, otros usan serpentinas de calor o microondas. Todos estos sistemas son carísimos de operar cuando son comparados a los hornos de des humidificación o convencionales. Los costos de operación son generalmente tres a cuatro veces más altos que los costos de los hornos de des humidificación. También la inversión y costos iniciales y de manipulación son mucho más altos, a causa de las cargas más pequeñas. También el secado desigual es un problema. Cuando el costo de producción anual es comparado en base al costo del millar de pies tabla, los costos del sistema al vacío son mucho más altos que de des humidificación. Secado al vacío puede usualmente justificarse cuando se está secando maderas duras y gruesas.

### **Cómo funcionan los hornos de des humidificación**

Los hornos de des humidificación utiliza una bomba de calor para extraer el agua de la madera. Según Vargas, A. Y Montealegre (1998); Una ventaja primaria de este tipo de sistema es que continuamente reciclan el aire caliente en vez de desfogarlo fuera, como lo hace un horno convencional. Por consiguientes, son más eficientes en el uso de energía y su costo de operación al final del ciclo de secado resulta más bajo. Esto es exacto, no obstante que los hornos de des humidificación utilizan energía eléctrica para hacer funcionar: los ventiladores, fuelle (que jala el aire sobre la serpentina de des humidificación), y compresor de refrigeración. La razón que un sistema de des humidificación cuesta menos de operar, reside en la capacidad de conservar energía por reciclar calor. Siendo el calor constantemente reciclado, la cantidad de electricidad requerida por el sistema es pequeña, y al final del ciclo de secado resulta generalmente más económico que un sistema convencional, que, aunque utilizando combustible más barato, necesita mucho más de ese combustible para hacer el mismo trabajo.

En un horno de des humidificación, el aire caliente (usualmente comenzando con un calor de acerca de 85°F o 29° C) es circulado sobre la madera con ventiladores



de circulación separados, evaporando el agua contenida en la madera. Luego este aire húmedo y caliente pasa sobre una serpentina de refrigeración donde es enfriado a acerca de 60°F (15° C). En la serpentina de refrigeración, este aire húmedo y caliente se condensa en agua que se drena fuera como una corriente de agua fría y el calor retorna a la cámara para calentar el aire otra vez—en lugar de ser todo expulsado como una nube de vapor, como lo hace un horno convencional. La eficiencia del uso de energía por reciclaje del calor tanta, que cada vez que este proceso ocurre, el aire que sale de la serpentina de refrigeración lo hace a una temperatura aún más elevada que cuando entró. Así la temperatura del aire se eleva, y ultimadamente puede alcanzar temperaturas tan altas como 160°F (72° C), o aún más altas como 225°F (107° C), en el nuevo sistema VHT de Nyle. Si la temperatura llegara a ser más alta que la deseada, el operario puede descargar el calor excedente al exterior. Los hornos de des humidificación son bien fáciles de operar y son bien popular es en operaciones que están iniciándose en secando madera; al igual que en operaciones experimentadas que desean un sistema que requiera atención mínima para conseguir un secado cero defectos.

### **Son los hornos de des humidificación más caros de operar que los hornos convencionales**

No. Actualmente son menos caros de operar que los hornos convencionales, pues los hornos de des humidificación son mucho más eficientes en el uso de energía, reduciendo los costos operacionales dramáticamente. En un horno convencional además de los costos de operación, manejo de materiales, y mantenimiento, se tiene que considerar el costo de la caldera y/o quemador y los costos relacionados a su operación y mantenimiento. Cuando se agrega todo eso, los hornos de des humidificación, con todos los costos de operación y mantenimiento son aún bastante más económicos qué los hornos convencionales. Para que pueda hacer sus propias comparaciones detalladas de costo, denos una llamada. Lo ayudaremos a hacer un análisis completo de costos de operación basado en su tarifa eléctrica local y otros costos de combustible.

## Elementos del secado

Luego de establecer las variables que controlan el proceso de secado se puede esquematizar, como se indica en la figura, los elementos constitutivos de un horno de secado, orientados a la automatización.

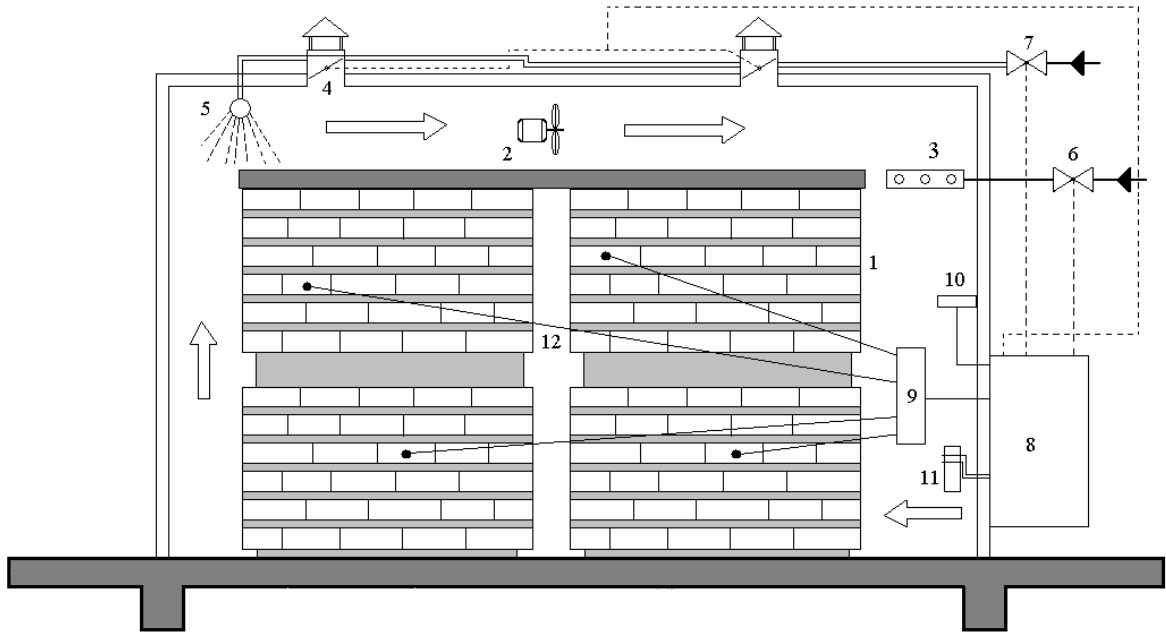


Figura # 1: Esquema general de un horno de secado de madera; Fuente: Nyle

- 1) Madera
- 2) Sistema de Ventilación
- 3) Sistema de Calefacción
- 4) Válvulas de entrada y salida de aire
- 5) Sistema de Humidificación
- 6) Válvula para control de Calefacción
- 7) Válvula para control de Humidificación
- 8) Equipo de control y acondicionamiento de señales.
- 9) Equipo de medición de la humedad en la madera.
- 10) Sensor de Temperatura en Seco
- 11) Sensor de Temperatura con Humedad ambiente.
- 12) Sensores para la medición del contenido de humedad en la madera.

## **Aprovechamiento de la energía solar.**

### **Aprovechamiento de la energía solar.**

La radiación solar se puede aprovechar de tres distintas maneras:

Directa. Una de las aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, por ejemplo, para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar. Otra aplicación directa, muy común, es el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simple.

### **Térmica.**

Se denomina "térmica" la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por medio del calentamiento de algún medio. La climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc., son aplicaciones térmicas.

### **Fotovoltaica.**

Se llama "fotovoltaica" la energía solar aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, capaces de convertir la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por un efecto térmico.

### **Secado solar.**

Muchos productos agrícolas requieren un secado post-cosecha para su adecuada conservación hasta que llegan a los centros de consumo. Aún en el caso de los productos que se comercializan en forma fresca, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción. En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió hace varias décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y mayores precios de los combustibles ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de la energía solar, tratando de desarrollar diversas técnicas que permiten solucionar los problemas mencionados en relación al secado al aire libre.

## **Principios del secado de la madera**

La tecnología del secado, estudia el procedimiento de sacar el agua de la madera, de forma de obtener un producto sin defectos ni alteraciones que disminuyan su valor y que puedan seguir transformándose sin causar problemas derivados del secado. Por tal motivo el hombre con el propósito de mejorar las condiciones con las que la madera obtenga las características apropiadas para su utilización y comercialización, ha llevado a la tarea de estudiar la manera de cómo acelerar su proceso de secado y el mejoramiento de la madera

Con el paso del tiempo se ha avanzado en el estudio de diversas formas de secado como es el sacado en hornos. Algunos de los problemas son: llegar a una temperatura óptima de secado, que la temperatura se conservara durante un periodo de tiempo prolongado. Pero una de las grandes problemáticas fue, que nos ayudaría a conservar ese calor generado, para ello se han creado cámaras de secado de diversos materiales que tienen la propiedad de no permitir la fuga de calor, estos son los materiales aislantes térmicos, cuya propiedad es la conductividad térmica y que de acuerdo a cada material cambia como es el caso de los metales con una conductividad muy alta que en comparación de los materiales cerámicos su conductividad es muy baja.

La tecnología ha ayudado en la creación y utilización de materiales aislantes sintéticos como el poliestireno con una conductividad térmica muy baja al igual que el poliuretano y otros materiales sintéticos.

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar, se desarrollaron en gran medida durante la crisis del petróleo a mediados de la década de los 70', aunque los conceptos básicos se conocían desde mucho antes. Específicamente, lo que concierne al secado solar, tiene relación con dos interesantes fenómenos físicos: el fenómeno del cuerpo negro y el efecto invernadero. El primero consiste en que si sobre un cuerpo pintado de negro, se hace incidir un haz luminoso, después de que se corta la fuente de luz, el cuerpo negro en forma espontánea, emite cierta energía (en forma de calor).

## **La constante solar**

La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, se llama constante solar, y su valor medio es  $1.37 \times 10^6 \text{ erg/s/cm}^2$ , o unas 2 cal/min/cm<sup>2</sup>. Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0,2% en un periodo de 30 años. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la Absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

## **El efecto invernadero**

El efecto invernadero, también se conoce desde la antigüedad, consiste en que en una caseta de vidrio, la temperatura interior es mayor que la exterior. Esto se explica por el fenómeno del cuerpo, puesto que la luz que pasa a través del vidrio, es absorbida por los cuerpos que están dentro de la caseta, que a su vez, liberan la energía en forma de calor. El efecto invernadero se completa, porque los materiales transparentes, sólo lo son a ciertas longitudes de onda, mientras son transparentes a la luz visible y UV, no lo son a la radiación infrarroja, por lo tanto, la energía se va acumulando dentro de la caseta.

Los secadores solares más difundidos, consisten en una estructura de invernadero, donde el aire se renueva en forma constante por la puerta, y se aprovecha a la salida cuando ha adquirido mayor temperatura, para secar hierbas y otros productos vegetales. Se han desarrollado múltiples modelos de secador, aprovechando distintos materiales plásticos para producir el efecto invernadero. Sin embargo, la mayor limitante que tienen estos diseños, es que se necesita una gran superficie para calentar el aire, lo que se traduce en espacio e infraestructura cara inutilizada.

Para expresar la potencia solar y en general, de cualquier radiación- se utiliza el término irradiancia. La irradiancia, ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo  $G$  para la irradiancia, junto con los subíndices adecuados:  $G_o$ ,  $G_b$ ,  $G_d$ , para la irradiancia extraterrestre, directa, difusa, etc. Nótese que la irradiancia tiene la virtud de indicar muy claramente que la radiación es un fenómeno que transcurre en el tiempo, que no es estático. Es energía que incide instantáneamente sobre una superficie.

Cuando incide la radiación sobre un plano, durante un tiempo determinado, puede hablarse entonces de que incidió una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía, por unidad de área, que incide durante un período de tiempo dado, recibe el nombre de irradiación.

La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol. Por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, en un día despejado, es la que proviene del cielo azul. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa.

## **El Aislamiento Térmico**

Es el método con el cual se trata de aislar térmicamente una superficie reduciendo la transferencia de calor hacia o desde el ambiente mediante el uso de materiales aislantes o de baja conductividad térmica. Su principal objetivo es mantener las condiciones térmicas de la cámara lo cual significara una mayor estabilidad del sistema, esto es, cuanto menos se pierda calor por las paredes la temperatura se mantendrá constante o por lo menos tardara más tiempo en disiparse por las paredes, con lo cual se verá beneficiado el sistema porque tendrá un ahorro en al

consumo de combustible para mantener sus condiciones durante un periodo de tiempo más prolongado.

### **Presión de vapor.**

Se define como presión de vapor de un líquido en equilibrio con su vapor, a la presión que ejercen las moléculas que escapan de la fase líquida (en equilibrio con las que retornan de la fase vapor). Dicha presión de vapor aumenta al elevarse la temperatura, llegándose a un límite que es la presión crítica, en el que la fase líquida desaparece.

Cuando la presión de vapor del líquido es igual a la presión externa que ejerce el gas en contacto con el líquido, se observa la formación de burbujas en el seno del líquido y se dice que éste entra en ebullición. Así pues, el punto de ebullición de un líquido se define como la temperatura a la cuál su presión de vapor es igual a la presión externa. Si se produce una disminución de la presión externa, el punto de ebullición disminuye, mientras que un aumento de la presión externa provocará un aumento del punto de ebullición.

### **Calor latente de vaporización:**

Para pasar de la fase líquida a la fase de vapor se necesita una absorción de energía por parte de las moléculas líquidas, ya que la energía total de estas es menor que la de las moléculas gaseosas. En el caso contrario, en la condensación, se produce un desprendimiento energético en forma de calor. El calor absorbido por un líquido para pasar a vapor sin variar su temperatura se denomina calor de vaporización. Se suele denominar calor latente de vaporización cuando nos referimos a un mol.

El calor específico es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (kelvin o grado Celsius).

## Características de la madera

### Propiedades de la madera

#### Anisotropía

La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que se considere. Como resultado de esa desigual configuración, presenta un desigual comportamiento.

Para tener una idea de cómo se comporta, la madera resiste entre 20 y 200 Veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal; Este comportamiento tan desigual de la madera, hace obligado denominar de forma diferente, los planos y direcciones que se consideren.

Dirección axial: la del eje del árbol

Dirección radial: la dirección de los radios, perpendicular al eje del árbol.

Dirección Tangencial: la dirección tangencial del árbol, perpendicular al eje del árbol

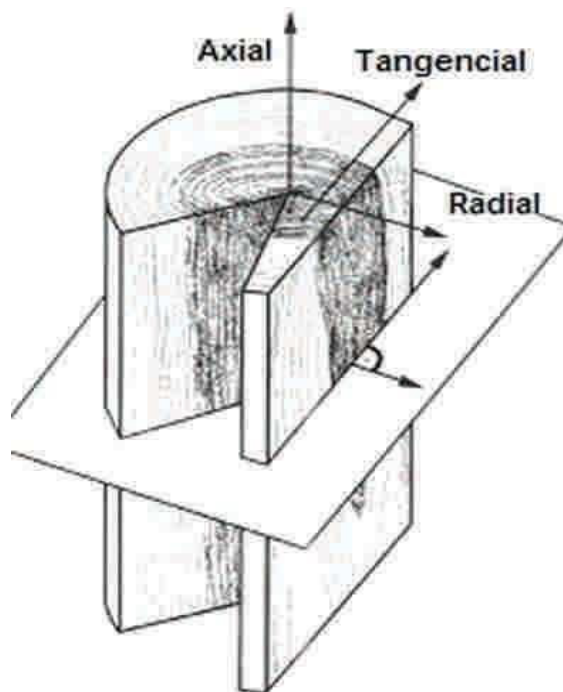


Figura 2: Principales direcciones de la madera, fuente: Anisotropía, Fuente Nyle



## Higroscopia

La propiedad que tienen los cuerpos de establecer un intercambio de humedad con el ambiente se denomina higroscopicidad.

La madera es un material higroscópico. Tiene la capacidad de captar y ceder humedad en su medio, proceso que depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente. Este comportamiento es el que determina y provoca cambios dimensionales y deformaciones en la madera.

Se puede establecer que el agua puede estar contenida en la madera en las siguientes formas (L. García, 1989):

**Agua de desorción:** (la que esta retenida o impregnada en la madera) es la que está retenida por fuerzas de tipo Van der Waal, consecuencia de los grupos polares activos de la pared celular. Esta agua es la que más fuertemente queda retenida por la pared celular. La madera puede llegar a contener un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, como consecuencia de esta fuerza.

**Agua de absorción:** es el agua que queda retenida en la pared celular como consecuencia de la fuerza de adhesión superficial. La madera puede llegar a contener un 6 % a un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca.

**Agua de condensación o capilar:** es la retenida por fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibrillas. La madera puede llegar a contener entre un 14 % a un 16 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca.

**Agua libre:** es la contenida en el lumen de las células prosénquimatosas. Su fuerza de retención es muy pequeña, de forma que no puede captar agua de la atmósfera, solo puede introducirse si se produce una inmersión de la madera en agua.

## La madera y el agua

El porcentaje de humedad  $H\%$  de una madera esta determinada por la siguiente relación:

$$H\% = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot 100 \quad (2.5)$$

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente, el más importante, dado que, afecta a la mayoría de los procesos de transformación de la madera. Aún es más, las características de comportamiento de la madera, están muy influenciadas por el contenido de humedad de la madera.

Así, la humedad de la madera influye de forma determinante en la concepción de procesos tales como el aserrado, el desenrollo, el cepillado, el encolado, el barnizado, etc. Respecto al comportamiento, la humedad es un factor determinante en su durabilidad, en su resistencia, peso,... y sobre todo en sus dimensiones, es decir, que la madera varia en sus dimensiones con el contenido de humedad, hinchándose cuando gana humedad y mermando cuando la pierde.

### La relación entre el agua y la madera funciona de la siguiente forma:

Sea un árbol recién aserrado e introducido en un patio de oreado. En el primer instante, la madera posee un alto contenido de humedad, dado que el agua llena todos los huecos entre las fibras elementales, entre las microfibrillas, entre las fibras, e incluso gran parte del lumen celular contiene agua. En esos momentos el porcentaje de humedad de la madera oscila alrededor del 80 %, siendo muy numerosos los casos, en el que el porcentaje de humedad es superior al 100%.

El aire del patio oreado, como consecuencia de la fuerza desecante que tiene, absorbe el agua de la superficie, dejando la primera capa de células sin casi agua. Esta capa de células, al estar más secas que la segunda capa, absorben parte del agua que tienen, de forma a igualar su humedad, y así sucesivamente hasta llegar al interior de la madera.

El resultado es que el aire va quitando agua de los huecos de la madera, primero del agua del lumen celular, después el agua adherida superficialmente por fuerzas capilares de la pared celular, el agua retenida por adhesión superficial y el agua retenida en los grupos polares de la celulosa. Según se va secando la madera, va aumentando su fuerza desecante y disminuyendo la del aire, con lo que llega un momento que ambas fuerzas se equilibran, con lo que cesa el intercambio de agua. En ese momento se dice que la madera ha alcanzado el punto denominado de Humedad de Equilibrio Higroscópico HEH.

Se denomina humedad de Equilibrio Higroscópico HEH la humedad de la madera a la que se equilibra la fuerza desecante de esta con la de la atmósfera. También se puede definir como el porcentaje de humedad que alcanzaría una madera a lo largo del tiempo, sometida a unas ciertas condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente.

Como el aire cambia de condiciones climáticas constantemente, este punto de equilibrio HEH también cambia constantemente, tomando agua de la madera cuando disminuye la fuerza desecante del aire o cediendo agua la madera cuando aumenta la fuerza desecante del aire.

Como los cambios climáticos del aire se suceden continuamente del día a la noche, según las estaciones..., hace que la humedad de la madera también cambie continuamente, si bien en valores muy pequeños.

La HEH máxima que puede tener una madera, cuando se le expone a un ambiente saturado de humedad es del 30 %, esta es la humedad que satura todos los huecos existentes entre las fibrillas elementales, entre microfibrillas y entre las fibras que componen la pared celular. A este punto de humedad se le denomina punto de saturación de la fibra PSF.

Para que la humedad adquiera mas humedad que la correspondiente al PSF, es necesario sumergirla en agua, y llenar espacios existentes en el lumen celular.

## La hinchazón y contracción de la madera

La madera cambia de dimensiones, aumentando o disminuyendo cuando toma o cede por debajo de su punto de saturación de la pared celular (PSF).

Ello es debido a que el espacio existente entre las microfibrillas y sobre todo interfibrillas elementales, disminuye cuando disminuye el contenido de agua o aumenta cuando aumenta el contenido de agua de la madera. Al variar el tamaño de este espacio, también varía el tamaño de la pared celular, y el de la célula y con ello el de la madera.

### Anisotropía

Como la madera es isótropa los cambios dimensionales se realizan de forma diferente según la dirección que se considere, denominándose:

Cv -contracción volumétrica al total de lo que contrae una madera desde donde está por encima del PSF hasta el 0% de humedad.

Ccv –coeficiente de contracción volumétrica a lo que contrae una madera por perder un 1% de humedad cuando se está por debajo del PSF.

Cl<sub>t</sub> –contracción lineal tangencial, Cl<sub>r</sub> –contracción lineal radial, Cl<sub>a</sub> – contracción lineal axial. Como al total de lo que contrae en esa dirección cuando la madera se seca desde un punto superior al PSF hasta el 0% de humedad.

Coeficiente de contracción lineal tangencial C<sub>ct</sub>, radial C<sub>cr</sub> o axial C<sub>cl</sub> a lo que contrae en esa dirección cuando la madera pierde un 1% de humedad y está por debajo del PSF.

De forma aproximada, se cumple la siguiente relación:

$$C_{cv} = C_{ct} + C_{cr} + C_{ca} + C_{dw} \dots\dots\dots (2.6)$$

## Densidad o peso específico

Es la relación entre el peso P y el volumen V de una madera

$$\frac{P}{V} \dots\dots\dots (2.7)$$

Como el peso y el volumen de una madera está afectado por el porcentaje de humedad, al hablar de densidad se debe siempre significar la humedad a la que está hecha la medida, es decir que se debe de hablar de densidad de la madera a una determinada humedad como puede ser el 0% (densidad anhidra), del 12% (densidad normal) o a otra humedad de la madera.

$$\frac{P}{V} \dots\dots\dots (2.8)$$

## resistencia mecánica

La madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco- elástico. Ante una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga.

El valor de la deformación, en el estado plástico es muy elevado respecto de cualquier otro material. Es decir, la madera es muy deformable. Respecto a sus valores de resistencia, en dirección longitudinal es relativamente muy resistente, mientras que transversalmente, su resistencia es muy pequeña que muchas veces no se considera.

## Dureza

Es una propiedad que indica la facilidad de penetración de un material a otro.

La madera en relación con otros materiales (acero y hormigón), se puede definir como blando, que en algunos aspectos se puede considerar un defecto (facilidad

de rayado y por lo tanto pérdida de apariencia de superficie) tiene como ventajas, su facilidad de procesamiento (corte, unión...).

## **Otras características**

### **Propiedades térmicas**

Dilatación térmica: la dilatación térmica de la madera es prácticamente nula, comparada con el acero u otros materiales metálicos.

Conductividad térmica: la madera es uno de los materiales más aislantes que tiene el hombre solo superado por el corcho, o ciertos materiales sintéticos.  $K_{madera} = 0.1$  a  $0.15 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ .

### **Propiedades eléctricas**

La madera seca es muy mala conductora de la electricidad, pero conforme aumenta su porcentaje de humedad, la conductividad aumenta de forma muy directa, hasta el punto, que esta propiedad se utiliza para medir la humedad de la madera de forma rápida.

### **Propiedades acústicas**

Aislamiento acústico frente a ruidos aéreos externos  
Aislamiento acústico frente a ruidos aéreos internos: reverberación  
Aislamiento acústico frente a impactos  
Transmisión acústica

### **La transferencia de calor**

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. Siempre que exista una diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.

Cuando existe una diferencia de temperatura en un medio estacionario, que puede ser un sólido o un fluido, se le llama conducción cuando ocurre una transferencia de calor en este medio. Se utiliza el término convección cuando existe una diferencia de temperatura entre un sólido y un fluido en movimiento. El término radiación es utilizado cuando dos superficies a diferentes temperaturas finitas emiten energía en

ausencia de un medio en forma de ondas electromagnéticas. Los fenómenos de la transferencia de calor tienen un papel muy importante en los procesos industriales, tanto en la producción y conversión de energía como es el caso de la generación de energía eléctrica mediante fisión nuclear, donde intervienen procesos de conducción radiación y convección en sistemas como calderas condensadores y turbinas. La transferencia de calor también influye fuertemente en el clima local y global, en la contaminación del aire y del agua.

## **conducción**

En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el amianto tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

La convección es el término que se usa para describir la transferencia de calor desde una superficie a un fluido en movimiento. En contraposición con la conducción,

La fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

Tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

La transferencia de calor por conducción y convección requiere la presencia de un gradiente de temperatura en alguna forma de materia. Por el contrario, la transferencia de calor mediante radiación térmica no requiere de materia.

Es relevante para muchos procesos industriales de calentamiento, enfriamiento y secado, así como también para métodos de conversión que incluyen la utilización de combustibles fósiles y la radiación solar.

Todas las formas de materia emiten radiación para gases y para sólidos semitransparentes, como vidrio y cristales de sal a temperaturas elevadas, la emisión es un fenómeno volumétrico, es decir, la radiación que emerge de un volumen finito de materia es el efecto integrado de la emisión local de a través del volumen.

En la mayoría de los sólidos y líquidos, la radiación emitida desde las moléculas interiores es fuertemente absorbida por las moléculas contiguas. Esta radiación que se emite en un sólido o líquido se originan de moléculas que están a una distancia de aproximadamente  $1\ \mu\text{m}$  de la superficie expuesta.

Una teoría considera a la radiación térmica como la propagación de una acumulación de partículas denominadas fotones o cuantos. Alternativamente la radiación se puede ver como la propagación de ondas electromagnéticas.

Se le atribuye a la radiación las propiedades características de las ondas, frecuencia  $\nu$  y longitud de onda  $\lambda$  para radiación que se propaga en un medio Particular

Prácticamente toda la radiación emitida a baja temperatura por los objetos del invernadero es de este tipo de longitud de onda y permanece atrapada en el



invernadero. Por esto, el vidrio permite que entre mucha más radiación que la que puede escapar, produciendo de ese modo el familiar efecto de calentamiento. La radiación solar absorbida por los objetos del invernadero debe finalmente cederse a los alrededores por convección desde las paredes exteriores del invernadero.

En el espectro de radiación del sol, se ha señalado que la mayor parte de la energía solar se concentra en la región de longitudes de onda cortas. Como consecuencia de este espectro, las superficies reales tienen propiedades de absorción considerablemente distintas para la radiación solar y para la radiación (terrestre) de longitud de onda larga.

### **Determinación del aislante adecuado para el secador.**

Se analizará los siguientes aislantes térmicos en base a sus propiedades de conductividad térmica, densidad, su temperatura de operación, haciendo comparaciones entre ellos para determinar el aislante óptimo para el horno de secado.

- ✓ Lana de vidrio
- ✓ Espuma de poliuretano
- ✓ Poliestireno
- ✓ Lana mineral

### **Lana de vidrio**

- ✓ Densidad: 100-200 Kg./m<sup>3</sup>
- ✓ Calor específico: 670 J/(Kg. · K)
- ✓ Conductividad térmica: 0.036-0.040 W/(m·K)
- ✓ Rango de temperaturas de operación: -30 °C a 540 °C

### **Espuma de poliuretano**

- ✓ Densidad: 40 Kg./m<sup>3</sup>
- ✓ Calor específico: 1674 J/(Kg. · K)

- ✓ Conductividad térmica:  $0.029 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- ✓ Rango de temperaturas de operación:  $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

El poliuretano es un polímero orgánico formado por reacción de un poliol (un alcohol con más de dos grupos reactivos hidroxilo por molécula) con un diisocianato o un isocianato polimérico en presencia de catalizadores y aditivos adecuados. Los poliuretanos son espumas flexibles utilizados en los colchones, recubrimientos resistentes a químicos, adhesivos y selladores, aislamiento de edificios y aplicaciones técnicas, como intercambiadores de calor, tubos de refrigeración y mucho más.

### **Poliestireno**

- ✓ Densidad:  $35 \text{ Kg./m}^3$
- ✓ Calor específico:  $670 \text{ J/(Kg.}\cdot\text{K)}$
- ✓ Conductividad térmica:  $0.157 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- ✓ Rango de temperaturas de operación:  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$

El poliestireno expandido no es higroscópico, a diferencia de lo que sucede con otros materiales del sector del aislamiento y embalaje. Incluso sumergiendo el material completamente en agua los niveles de absorción son mínimos con valores oscilando entre el 1% y el 3% en volumen.

Al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular del EPS cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas.

Con respecto al extremo superior el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  para acciones de corta duración, y alrededor de los  $80^{\circ}\text{C}$  para acciones continuadas

### **Lana mineral**

- ✓ Densidad:  $100\text{-}200 \text{ Kg./m}^3$
- ✓ Calor específico:  $670 \text{ J/(Kg.}\cdot\text{K)}$

- ✓ Conductividad térmica: 0.036-0.040 W/(m·K)
- ✓ Rango de temperaturas de operación: 0 °C a 1000 °C

La lana mineral es de vidrio fundido, piedra o escoria que se hace girar en una estructura de fibra-como. Roca o escoria inorgánicas son los componentes principales (típicamente 98%) de lana de roca. El restante 2% el contenido orgánico es generalmente un aglutinante de resina termoestable (un adhesivo) y un poco de aceite.

### Análisis de las pérdidas por unidad de área para los aislantes

AISLANTE	CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/(m·K))	RANGO DE TEMPERATURA °K	AREA m <sup>2</sup>	ESPESOR M	PERDIDA DE CALOR WATTS
LANA DE VIDRIO	0,04	48	1	0,0254	76,59
				0,0508	37,80
				0,0762	25,20
				0,1016	18,90
ESPUMA DE POLIURETANO	0,029	48	1	0,0254	54,80
				0,0508	27,40
				0,0762	18,27
				0,1016	13,70
POLIESTIRENO	0,157	48	1	0,0254	296,69
				0,0508	148,35
				0,0762	98,90
				0,1016	74,17

Tabla 1: Comparación de aislantes # 1

Comparación de la energía por unidad de área necesaria para elevar la temperatura para cada aislante

AISLANTE	RANGO DE TEMP. $^{\circ}\text{C}$	ESPESOR M	VOLUMEN $\text{M}^3$	CALOR ESPECIFICO $\text{Kcal/kg}^{\circ}\text{C}$	DENSIDAD $(\text{kg/m}^3)$	CALOR Kcal
LANA DE VIDRIO	48	0,0254	0,0254	0,1600	200	39,0144
		0,0508	0,0508			78,0288
		0,0762	0,0762			117,0432
		0,1016	0,1016			156,0576
ESPUMA DE POLIURETANO	48	0,0254	0,0254	0,3998	40	19,4974
		0,0508	0,0508			38,9949
		0,0762	0,0762			58,4923
		0,1016	0,1016			77,9898
POLIESTIRENO	48	0,0254	0,0254	0,2866	35	12,2298
		0,0508	0,0508			24,4596
		0,0762	0,0762			36,6894
		0,1016	0,1016			48,9192

Tabla 2 Comparación de aislantes # 2

La tabla anterior (fig.2) muestra la variación de calor requerido para elevar su temperatura desde la temperatura ambiente de  $22^{\circ}\text{C}$  hasta la de operación de  $54^{\circ}\text{C}$ , cuando el espesor varía a razón de una pulgada espesor y en donde se observa que el aislante que requiere menor calor para elevar su temperatura es el poliestireno.

La siguiente figura (fig.2) muestra la comparación de las pérdidas de calor en cada aislante cuando este varía su espesor a razón de 1 pulgada y en donde se observa que el material que presenta menor pérdida es el poliuretano pero que además el aislante de poliestireno presento una mayor disminución de pérdidas de calor en comparación de su valor más alto.

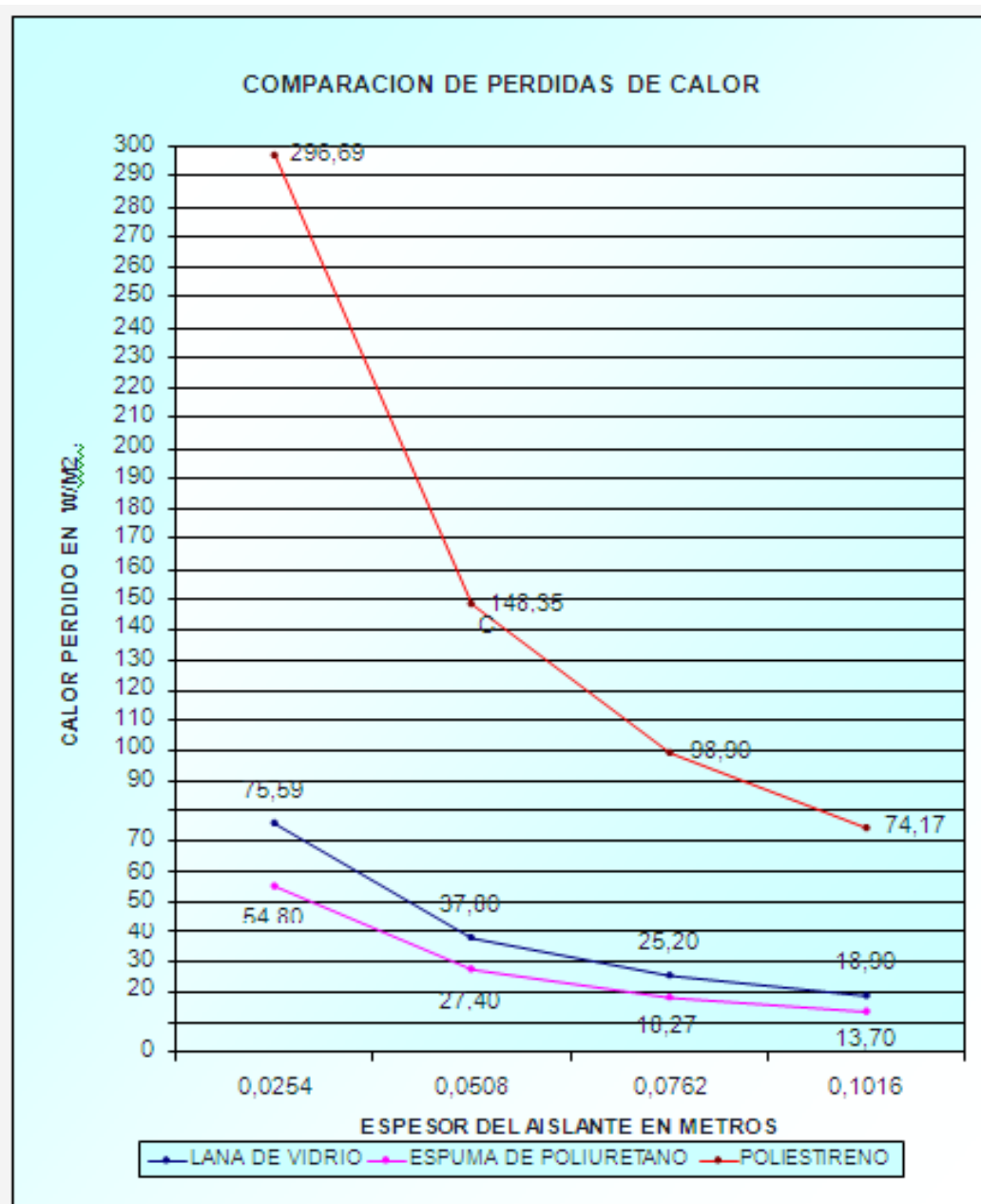


Tabla: comparación de pérdidas de calor por aislante

La siguiente figura muestra la variación de calor requerido para elevar su temperatura desde la temperatura ambiente de 22 °C hasta la de operación de 54 °C, cuando el espesor varía a razón de una pulgada espesor y en donde se observa que el aislante que requiere menor calor para elevar su temperatura es el poliestireno.

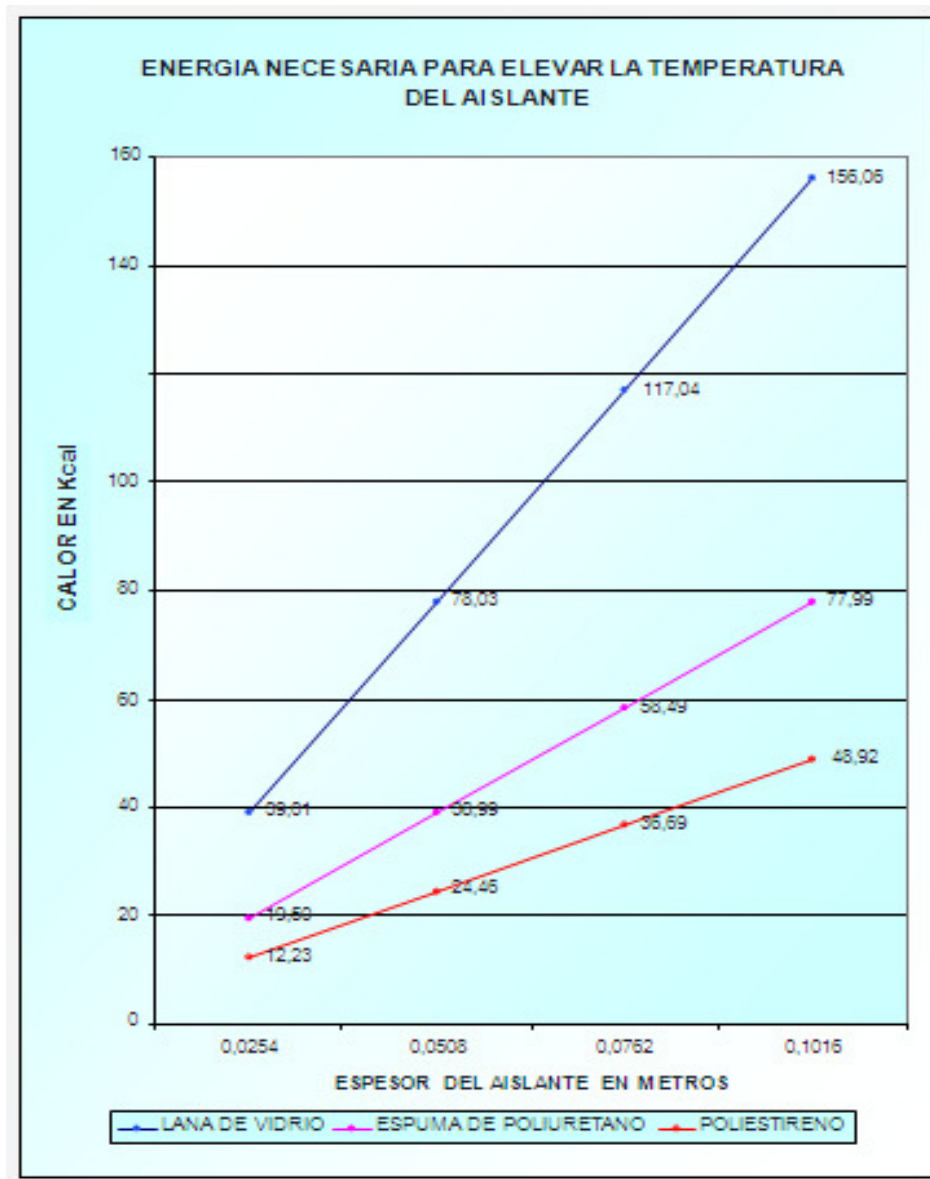


Tabla 4: Variación de energía requerida para elevar La temperatura del aislante

La siguiente figura (fig. 4) muestra la variación de la temperatura que se presenta en la parte media del arreglo entre el aislante y la estructura (ladrillo).que está dada en °C para cada tipo de aislante y con una variación de sus espesores con incrementos de una pulgada.

El material aislante que presenta una temperatura más baja en este punto medio entre el aislante y el ladrillo es el poliuretano, sin embargo, el poliestireno presenta una mayor diferencia entre su valor máximo y su valor Mínimo.

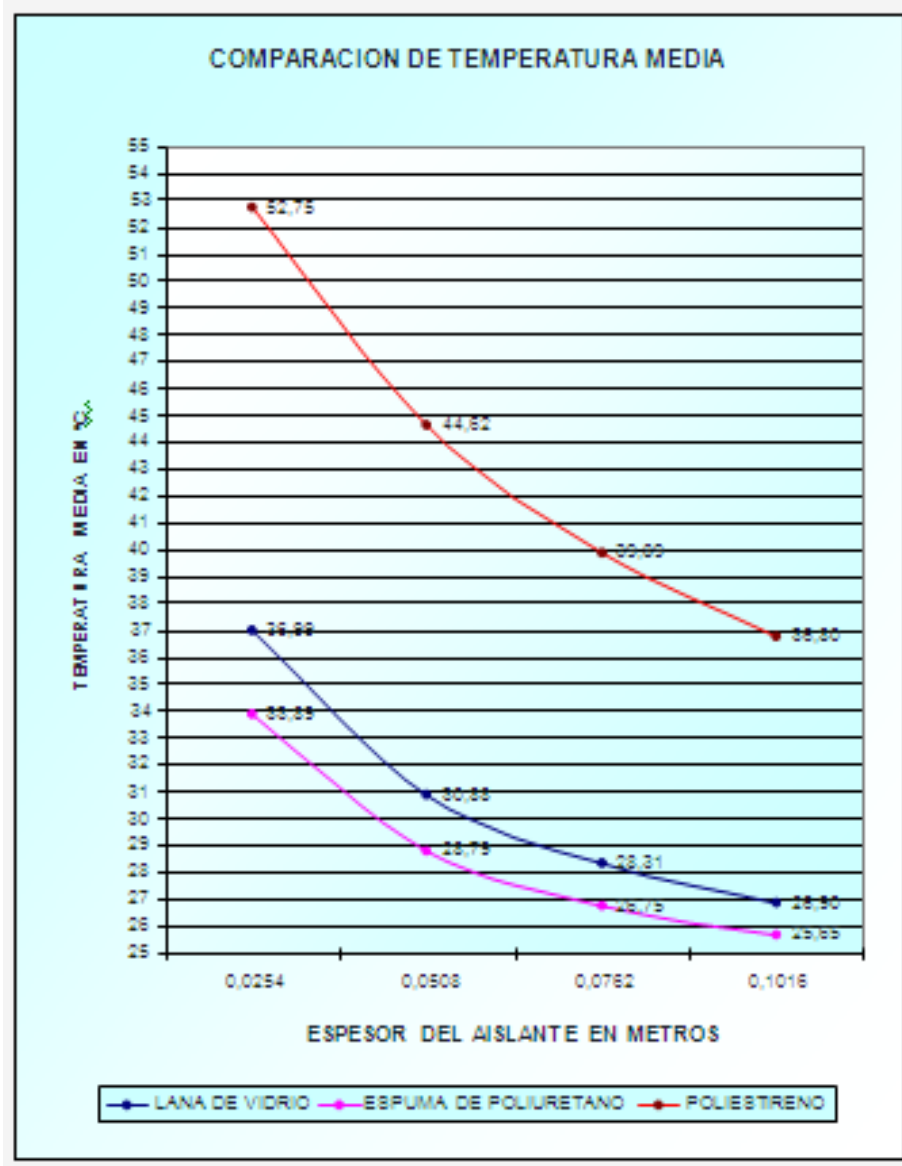


Tabla 5: comparaciones de temperatura intermedia.

## **Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con la madera**

### **Albura y Duramen**

La albura de las coníferas generalmente tiene un contenido de humedad mayor que el duramen mientras el contenido de humedad de la albura de las latifoliadas es algo más alto o igual que el del duramen. La infiltración de gomas, resinas y otros materiales en el duramen lo hacen menos permeable que la albura, por esto el duramen usualmente requiere tiempos de secado más largos. También la baja permeabilidad del duramen lo hace más susceptible a ciertos defectos de secado y requiere condiciones de secado más suaves.

### **Anillos de Crecimientos**

La madera aserrada radial o tangencialmente responde de manera diferente al secado. Así, la cortada tangencialmente (0-45 °C) es menos susceptible al colapso, se contrae y se dilata menos en espesor y seca más rápido que la de corte radial, mientras que la de corte radial contrae y se dilata menos en ancho y tiene menos torceduras, abarquillado y grietas superficiales que la de corte tangencial.

### **Radios**

Debido a que los radios son débiles y secan más rápido que las células de alrededor, usualmente ocurren grietas en los extremos, en la superficie y cerca de ellos. Especies tales como el cedro, con radios grandes, requieren especial cuidado durante las primeras etapas del secado.

### **Grano y Textura**

La madera de grano recto es más fácil de secar que la madera de grano entrecruzado o en espiral como la caoba que es más difícil de secar sin que ocurran alabeos. La madera de grano grueso o basto seca más rápidamente que la de grano fino, y la madera de grano uniforme desarrolla menos defectos de secado que la madera de grano no uniforme.



## Color

Las maderas de color claro generalmente se oscurecen con el secado, especialmente cuando se aplican altas temperaturas. Pero esto se puede volver beneficioso cuando se desea oscurecer la albura para obtener un mejor color y en este caso se usa vaporización antes del secado.

## Variaciones en la Estructura

La madera aserrada contiene variaciones en la estructura, tales como grano entrecruzado, nudos, madera de reacción, madera juvenil entre otros.

El grano en espiral, diagonal, entrecruzado contrae más en sentido longitudinal que el grano recto, tales maderas pueden presentar arqueadura, torcedura y encorvadura durante el secado. La madera juvenil y la de reacción también contraen más en sentido longitudinal que la normal y de igual manera pueden suceder arqueadura, torcedura y encorvadura, y cuando es restringida puede fracturar y formar grietas transversales en la madera aserrada.

## Densidad y Peso Específico

La densidad es una característica de gran interés en el secado. En general se puede decir que cuanto más densa es la madera más difícil es de secar. Cuanto mayor sea el peso específico mayor será la cantidad de madera seca por unidad de volumen de madera verde. Así, al mismo contenido de humedad, maderas con peso específico alto contienen mayor cantidad de agua y requieren más tiempo de secado que maderas con peso específico bajo. Así, el peso de la madera depende de su peso específico y de su contenido de humedad. El peso verde de 1 m<sup>3</sup> de madera puede ser calculado por la fórmula:

$$P_v = \frac{P_e(CH + 100)Da}{100}$$

Donde:         $P_e$  = Peso específico  
                  $CH$  = Contenido de Humedad  
                  $D_a$  = Densidad del agua

Por ejemplo, el peso verde de 1 m<sup>3</sup> de una especie con peso específico de 0,4 a 75% de contenido de humedad es 700 kg. El peso seco al horno (sustituyendo el contenido de humedad por cero en la fórmula) es 400 Kg. es decir, hay 300 Kg. de agua presente. A un peso específico de 0,6 igualmente a 75 por ciento de contenido de humedad, el peso verde es 1050 Kg. el peso seco al horno 600 kg. Por lo tanto el peso del agua es 450 kg. Así, hay 150 Kg. de agua más a 0,6 de peso específico que a 0,4.

### **Dimensiones de la Madera**

El tiempo de secado varía en forma exponencial con el espesor, por lo que al secar la madera se debe clasificar principalmente por espesor. En cambio el largo y el ancho de una pieza de madera no son determinantes en el comportamiento de la madera durante el secado.

### **Estado Fitosanitario**

Muchas maderas susceptibles al ataque de hongos e insectos sufren daños tan severos, en estado verde que no vale la pena secarlas. La única manera de conservar la calidad de estas maderas es un tratamiento profiláctico de las trozas en el bosque inmediatamente después de ser cortadas, y después de aserradas un baño profiláctico (antimancha más insecticida).

### **Contenido de Humedad inicial (CHI)**

La humedad inicial está en función de la época de corte y la acción del medio ambiente sobre la madera. CHI muy variados dificultan el secado, es recomendable, en lo posible, seleccionar lotes con contenidos de humedad homogéneos.

Contenido de Humedad Final (CHF)

Depende del uso final que se le vaya a dar posteriormente.

## **Factores que afectan la pérdida de humedad relacionados con las variables del proceso**

### **Temperatura.**

Recordemos que es necesaria la aplicación de algún tipo de energía calorífica para poder evaporar el agua de la madera, y estos requerimientos van en aumento a medida que progresa el secado, con el fin de liberar el agua de las grandes fuerzas higroscópicas con las cuales es retenida en la madera. La velocidad de evaporación depende a su vez de la gran cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire) para absorber la humedad liberada por la madera.

El suministro de calor en el secador es necesario para; (1) calentar la madera, (2) evaporar la humedad de la madera, (3) calentar el aire frío que entra en el secador y (4) reemplazar la pérdida de calor que absorbe la estructura del secador.

El método usual de calentamiento de la madera se realiza de forma indirecta a través de intercambiadores de calor colocados dentro del secador, éstos transportan los productos de la combustión de la fuente de calor como petróleo, gas, carbón, madera, aserrín o transportan agua caliente, vapor de agua, aceite térmico, etc . Los hornos de calentamiento directo no son apropiados para secar madera aserrada.

La temperatura óptima del secador depende, sobre todo de la especie, espesor, contenido de humedad inicial y del uso final de la madera a secar. Además, es importante tomar en cuenta que la temperatura, conjuntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro del secador y el contenido de humedad de equilibrio de la madera.

Como norma general, las mayores economías durante el secado se obtienen cuando se trabaja con las máximas temperaturas que pueda resistir la madera, puesto que el calor acelera la difusión de la humedad desde el interior de la pieza hacia su superficie. Mientras que bajas temperaturas son aplicadas para secar

maderas en las cuales pueden presentarse defectos como decoloración, exudado de resina y nudos sueltos al aplican altas temperaturas.

### **Humedad Relativa (HR)**

La humedad del aire es un factor importante para el control del contenido de humedad de la madera, particularmente en aquellos casos donde es necesario controlar la evaporación en la superficie de la misma. Así, la humedad relativa afecta el gradiente de humedad y la contracción de la madera, por lo tanto tiene una relación directa con los esfuerzos al interior de la pieza que pueden conducir a la aparición de defectos como torceduras y rajaduras.

La humedad relativa dentro de la cámara de secado generalmente se controla mediante un sensor y controlador del bulbo húmedo, en los secadores computarizados se controla el contenido de humedad de equilibrio (CHE) de la cámara mediante un sensor que envía la señal al programa principal. En caso de que el CHE sea menor que el programado para esta etapa de secado, se agrega vapor a la cámara a través de los rociadores o humidificadores, en caso contrario, que el CHE sea mayor que el programado se abren las ventilas colocadas en la parte superior del horno para permitir el escape de aire húmedo y la entrada de aire fresco.

La humedad relativa del aire afecta directamente la humedad de la madera, es decir si la HR del aire aumenta también aumenta la humedad de la madera y viceversa.

Esta aseveración se cumple cuando se mantiene la temperatura y cuando los procesos se llevan a cabo en un sistema cerrado, como en el caso de un secador para madera.

La humedad relativa del aire y en consecuencia la humedad de la madera está fuertemente influenciada por la temperatura. El aire caliente necesita una cantidad mayor de agua para saturarse que el frío y por lo tanto puede absorber mayor cantidad de agua de la madera.

## **Velocidad del aire.**

El aire dentro de la cámara puede circular por gravedad (ventilación natural) o por medio de ventiladores que producen una ventilación forzada, con el objeto de aumentar la velocidad del aire y con ello acelerar el secado de la madera.

La velocidad del aire dentro de la pila de madera tiene como funciones principales: transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y transportar la humedad saliente de la madera.

La capa límite que existe entre la madera y el aire juega papel importante en el secado de la madera. Cuanto menor sea el espesor de esta capa, más rápida será la remoción de la humedad de la superficie de la madera.

Al igual, la velocidad del aire desempeña papel importante en las primeras etapas del secado, sobre todo cuando la madera está muy húmeda ( $CH > 30\%$ ). A mayor velocidad de aire mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa. Es importante destacar que una buena ventilación es sinónimo de un buen secado, ya que juega un papel muy importante al principio del ciclo sobre la velocidad del secado y al final sobre la homogeneidad en el contenido de humedad de las piezas de madera en la pila.

Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen condiciones óptimas de secado, en la mayor parte de los casos, cuando el aire circula en la pila a una velocidad de 2 m/s. si se utiliza velocidades mayores sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera por cuanto se acelera considerablemente la tasa de evaporación del agua, generándose un gradiente de humedad muy alto entre la superficie de la madera y su parte interna.

En conclusión, desde el punto de vista económico es importante tener presente los elementos de control del secado de la madera (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire), que una modificación de las condiciones de circulación de aire en el secador implica mayores costos que cuando se opta por regular las condiciones de temperatura y humedad relativa. Para modificar la HR en un secador

a vapor, sólo se requiere aumentar o disminuir la cantidad de vapor rociado y/o aumentar la acción de las ventilas, por lo cual puede considerarse el método más económico. Para el caso de la temperatura, un aumento en la capacidad máxima de calentamiento puede exigir mayor capacidad del hogar de la caldera o una caldera adicional, cuyo costo sería en ambos casos mayor que cuando se alteran las condiciones de HR, pero menor que cuando se modifica la velocidad del aire, ya que la energía eléctrica consumida por los ventiladores es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad del aire.

### **La humedad en la madera**

Cuando el árbol está recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie. Forestal. El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas (agua libre, agua de saturación o higroscópica y agua de constitución).

El agua libre se encuentra ocupando las cavidades celulares o lumen de los elementos vasculares, dándole a la madera la condición de verde. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros.

Al iniciarse el secado, el agua libre se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el momento que ya no contiene más agua de ese tipo. En este punto la madera está en lo que se denomina “Punto de Saturación de las fibras” (PSF). Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías.

Durante esta fase de secado, la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Por tal razón, el PSF es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico y de algunas propiedades eléctricas de la madera.

El agua de saturación o higroscópica es la que se encuentra en las paredes celulares, es evaporada por difusión, y la pérdida de humedad ocurre con más lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante.

Para la mayoría de las especies el equilibrio higroscópico está entre el 12 y 18% de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado. La madera secada al aire libre sólo puede alcanzar estos valores de contenido de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, debe acudir al secado artificial para eliminar el resto de agua higroscópica.

El agua de constitución forma parte de la materia celular de la madera y que puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Su separación implica la destrucción parcial de la madera.

### **Determinación del Contenido de Humedad de la Madera**

La determinación del contenido de humedad en la madera se hace considerando sólo los valores de agua libre y de saturación. Es decir, que en la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando al secarla en estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  alcanza peso constante.

El contenido de humedad se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado en función del peso de esa pieza en condición seca al horno o anhidra. Su valor se expresa en porcentaje y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{CH} = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Donde:

CH = Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro

Ph = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial

Ps = Peso de la madera en estado anhidro; peso final o constante

Para determinar el contenido de humedad en la madera existen numerosos procedimientos, siendo los más aceptados el método de secado en estufa y los métodos eléctricos que utilizan detectores de humedad.

El método de secado en estufa es el más exacto y el único científicamente satisfactorio para determinar el agua contenida en la madera.

El éxito en la aplicación de este método depende de la correcta selección de muestras o probetas de desecación, las cuales deben ser representativas del lote de madera objeto de evaluación. El procedimiento es el siguiente.

Obtención de las probetas o muestras de control: de la pieza o tabla se corta un listón transversal de 15 a 20 cm. de espesor en la dirección del grano y a unos 50 cm del extremo de la pieza. Las muestras deben estar sanas y libres de defectos.

Determinación del peso húmedo o peso inicial: inmediatamente después de cortadas, las probetas deben pesarse en balanzas con una precisión de 0,1g para aquellas que pesan 100 gr o más y de mayor sensibilidad para probetas más pequeñas.

Secado de las probetas hasta peso constante: luego se introducen las probetas en la estufa para proceder con el secado. Se recomienda el uso de estufas con termostato regulable para mantener la temperatura a  $103 \pm 2$  °C y con buena circulación de aire.

Determinación del peso seco (peso constante): para determinar el momento en que las probetas alcanzan peso constante, se hacen pesadas intermedias con el fin de observar la disminución del peso. Después del secamiento, las probetas deben sacarse lo más rápidamente posible para evitar que absorban humedad del aire. De igual manera, para eliminar cualquier variación deben enfriarse en un ambiente absolutamente seco, que puede ser un desecador con cloruro de calcio o pentóxido de fósforo.



Ejemplo: calcule el contenido de humedad promedio de dos probetas o secciones de humedad cuando:

El contenido de humedad promedio de las secciones a y b es

$$\frac{66,47}{57,98} = 1,14646 \approx 1,15$$

Específicamente la resistencia eléctrica y las propiedades dieléctricas de la madera dependen, en una forma bien definida, de su contenido de humedad, sobre todo en el rango de 6 a 25% de contenido de humedad.

Los aparatos eléctricos que emplean la relación entre humedad y resistencia son los llamados “tipo resistencia”; aquellos que emplean la relación entre el contenido de humedad y constante dieléctrica se conocen con el nombre “tipo de capacidad”

y los aparatos que se basan en la relación entre el contenido de humedad y pérdida de fuerzas de radiofrecuencia se conocen con el nombre de “tipo radio frecuencia”.

Los del tipo resistencia se fabrican con electrodos cortos o largos, del tipo de aguja, aislados en toda su longitud menos en las puntas. Los medidores tipo radiofrecuencia por pérdida de potencia son fabricados con electrodos de contacto que se aplican a la superficie de madera sin perforarla; se utilizan para chapa o madera muy delgada.

## **Muestras para el control del secado**

### **Control Manual**

A medida que la madera se va secando, desarrolla esfuerzos que siguen un patrón asociado con los cambios de humedad. Como no es posible medir la humedad de toda la madera durante el proceso, es necesario acudir a muestras representativas de la carga. Estas muestras se colocan dentro de la pila, de forma que se pueda determinar su contenido de humedad periódicamente.

Si bien es necesario dañar algunas piezas de madera para obtener las muestras y se requiere tiempo y trabajo para efectuar el control, estos inconvenientes son recompensados por las ventajas que ofrece poder controlar la humedad durante el proceso. Entre ésta, es importante mencionar:

Indican la velocidad del secado Permiten detectar fallas que afectan la eficiencia de las cámaras Sirven para ajustar el programa de secado y los cambios climáticos Indican la necesidad de tratamientos de recuperación o acondicionamiento y la duración de ellos Ayudan a reducir los tiempos de secado y a mejorar la calidad Permiten controlar el contenido de humedad final Ayudan a determinar los horarios de secado

Estas ventajas se resumen en economía, madera libre de esfuerzos y humedad final más uniforme.

## Determinación del Contenido de Humedad y del Peso Seco al Horno de las Muestras

El contenido de humedad de la muestra de secado se obtiene del promedio de las dos probetas cortadas de cada uno de los dos extremos, utilizando el sistema de secado en estufa. Para tal efecto, después de cortadas, las probetas se limpian, marcan y pesan; luego se colocan dentro de una estufa con temperatura de  $103 \pm 2$  °C hasta obtener peso constante; se determina su contenido de humedad según la fórmula.

Inmediatamente después de cortada, la muestra de secado se limpia, se codifica, se sella en sus dos extremos con un producto impermeabilizante y resistente a la temperatura y se pesa. Dicho peso corresponde al peso inicial o verde de esa muestra.

El peso final o peso seco al horno (PSH) de la muestra se calcula en función de su peso inicial y su respectivo contenido de humedad (CH promedio de las probetas) utilizando la fórmula de CH convenientemente despejada:

Ph

$$PSH = \frac{Ph}{1 + \frac{CH}{100}} \times 100$$

donde Ph es el peso inicial de la muestra testigo

Ejemplo: calcular el peso seco al horno de la muestra testigo, siendo su peso inicial de 5,12 kg, utilizando el contenido de humedad promedio calculado de las secciones de humedad 1 y 2.

$$PSH \text{ de la muestra} = \frac{5,12 \text{ kg}}{1 + \frac{62,22}{100}} \times 100 = 3,156 \text{ kg}$$

## Colocación de las Muestras de Secado en las Pilas.

Una vez que las muestras testigos han sido cortadas, revestidos sus extremos y pesadas, se colocan en las cargas o paquetes de madera aserrada durante las operaciones de apilado. Dado que las muestras testigos representan al lote que se está secando, deben estar expuestas a las mismas condiciones de secado, ya que de otra manera darán una indicación falsa del porcentaje de contenido de humedad de la carga.

## El Uso de las Muestras Testigo Durante el Secado

Cuando el secado avanza, las condiciones climáticas de la cámara varían tomando como base el porcentaje de humedad de las muestras, en diferentes momentos del proceso. La frecuencia con que las muestras se pesen depende de la velocidad de pérdida de humedad: cuanto más rápida sea la pérdida, más frecuente serán las pesadas. Pero inmediatamente se realiza la pesada, las muestras deben ser colocadas nuevamente en la carga. Las muestras también se utilizan para hacer pruebas intermedias de humedad y controles de tensión mediante pruebas de tenedor.

Para determinar el CH actual de una muestra, se requieren dos pesos: el peso actual y el peso seco al horno calculado. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{CH actual} = \frac{P_h - PSH}{PSH} * 100$$

donde  $P_h$  es el peso actual de la muestra y

$PSH$  es el  $PSH$  calculado de la muestra.

Así, si el peso seco al horno calculado de la muestra es 3,156 kg y su peso actual es 4,52 kg. El porcentaje de humedad actual será:

$$\text{CH actual} = \frac{4,52 - 3,156}{3,156} * 100 = 43,22\%$$

Después de otro día de secado esta muestra puede pesar 4,20 kg. El CH actual de la muestra entonces sería

$$\text{CH actual} = \frac{4,20 - 3,156}{3,156} * 100 = 33,08\%$$

Cuando el contenido de humedad actual se utiliza para controlar la aplicación de un programa de secado, cada cambio de etapa se hace cuando el contenido de humedad promedio de las muestras es igual al contenido de humedad fijado por el programa.

A través del uso de estas muestras se puede calcular el peso que tendrá la misma cuando tenga cierto contenido de humedad. Empleando la fórmula:

$$P_a = \frac{P_{sh}(\text{CH} + 100)}{100}$$

Ejemplo: calcular el peso de la muestra anterior cuando alcance un CH de 10%.

$$P_a = \frac{3,156\text{kg}(10 + 100)}{100} = 3,472\text{kg}$$

Sucede con frecuencia que algunas muestras no siguen el ritmo de pérdida de humedad del resto. Si se descarta el mal funcionamiento de la cámara, se puede suponer entonces que el cálculo inicial del peso seco fue erróneo. En tales casos, conviene proceder a recalcularlo de la forma siguiente: recortar una porción de 10 a 15 cm en uno de los extremos, sacar una probeta de unos 25 mm y sellar el extremo resultante para luego pesar la muestra sobrante; con la probeta de humedad obtenida volver a obtener el CH y con éste recalcularlo el nuevo peso seco de la muestra que servirá para el control del secado. Esta prueba se aconseja

realizarla cuando se haya alcanzado un 20% de CH o cuando se estime que se ha llegado a la humedad final, antes del acondicionamiento.

Para algunas maderas propensas al colapso y endurecimiento es conveniente hacer un chequeo de tensiones cuando su contenido de humedad ha llegado al punto de saturación de las fibras. En tal caso, se procede de la siguiente forma: a una distancia de 10 a 15 cm de uno de los extremos de la muestra se cortan dos probetas de 25 a

30 cm de ancho; una de las probetas se utiliza para determinar el contenido de humedad y la otra para efectuar la prueba de tenedor. La muestra testigo recortada debe pesarse para calcular su nuevo peso seco al horno.

#### Contenido de Humedad Final, Prueba de Esfuerzos y Gradiente de humedad

Cuando se ha llegado a la humedad final, se han aliviado tensiones mediante acondicionamiento y la carga se ha sacado de la cámara, se utilizan las muestras de control de humedad para confrontar la humedad final y determinar la efectividad del acondicionamiento. Para ello, de la parte central de la muestra se cortan 3 probetas, cada una de 25 a 30 mm de ancho, una se destina a determinar, por el método de secado en estufa, el CH final; la otra a la prueba de tenedor para reconocer el estado de tensiones de secado; y la tercera para establecer el gradiente de humedad.

El procedimiento utilizado para conocer la distribución de humedad al interior de la pieza de madera es el siguiente: después de cortadas, se pesan separadamente las partes externas, intermedias e internas obtenidas de la probeta. Luego se llevan a la estufa hasta alcanzar su peso seco al horno. Con los datos del peso inicial y el peso seco al horno se calculan los contenidos de humedad correspondientes a las tres diferentes partes de la sección transversal de la pieza. Cuando el secado ha sido normal, incluyendo el periodo de acondicionamiento, la diferencia de humedad entre las partes externas y central no deben ser significativas (no mayores que 20%). En caso contrario, se presentarán deformaciones cuando la madera sea cortada.

La prueba de tenedor, se realiza para detectar las tensiones de secado, si el espesor de la madera es menor que 4cm se hacen dos cortes paralelos a la superficie correspondiente al ancho de la tabla, para obtener de este modo tres dientes y dejar dos después de eliminar el diente central. Si la madera en secamiento es mayor de 4cm se hacen cinco cortes, para obtener seis dientes y dejar cuatro después de eliminar el segundo y el quinto.

La dirección en la cual los dientes se orientan nos dirán como es el comportamiento de la madera. (1) Si las puntas exteriores se curvan hacia dentro considerablemente, la madera está sometida a tensiones. (2) Si las puntas exteriores están derechas, la madera está libre de tensiones, y (3) las puntas exteriores se han doblado hacia fuera considerablemente, la madera está sometida a una inversión de tensiones.

Cuando obtenemos el resultado (1), el acondicionamiento debe ser prolongado por algún tiempo. El resultado (3) nos indica que las cargas subsiguientes deben ser acondicionadas con una ligera mayor depresión del bulbo húmedo, o por un periodo de tiempo más corto.

## Diseño y funcionamiento del horno de secado solar.

## Diseño y funcionamiento del horno de secado solar.

Las secadoras solares son cámaras que tienen la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La idea es que el calor que se genera sea útil en el proceso de secado de la madera.

Las cámaras de secado tienen dos partes fundamentales: la primera se ubica en la parte superior de la cámara y es la responsable de que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de la madera que se requiere secar (Figura 5).

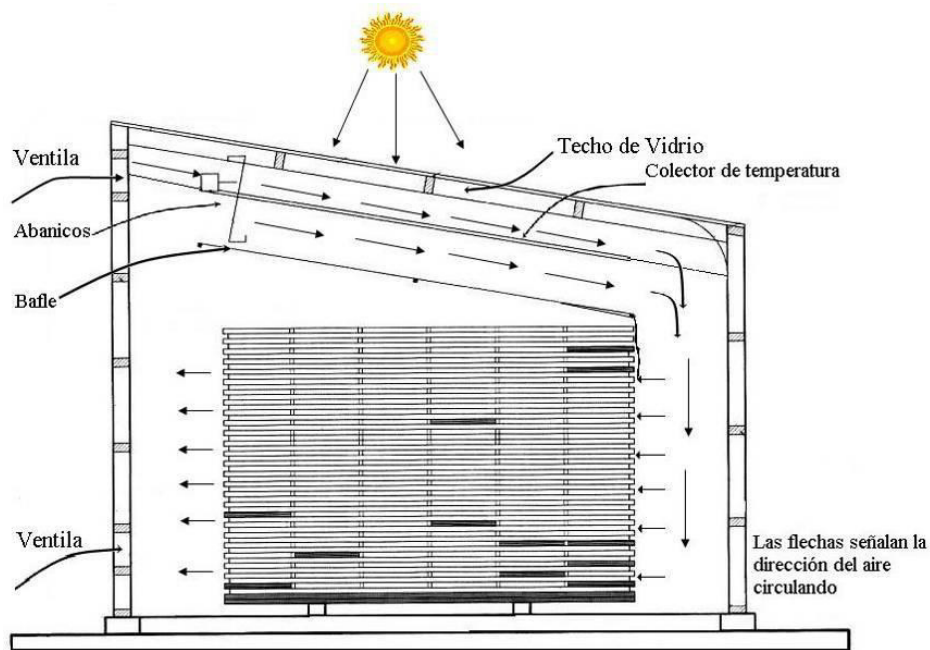


Figura 4. Principio general de un secador solar para madera, Fuente UCR-Cartago

El principio de funcionamiento de una secadora solar es simple. Una vez que el aire se calienta a lo interno de la secadora, ese aire se pone a circular entre la madera gracias a un sistema de ventiladores.



La masa de aire caliente se hace circular continuamente a través de la madera con el fin de que esta se caliente. Al elevar la temperatura el material empieza a

liberar el agua que contiene y por ende se seca. Esto permite que la madera descienda sus contenidos de humedad a los niveles deseados, según sean las necesidades de la industria. Las secadoras solares a pesar de que son muy simples en cuanto a diseño y funcionamiento, permiten y a la vez requieren de algún grado de control de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa. Esto es posible gracias a la instalación de ventanas o ventilas que permitan intercambiar el aire húmedo de la cámara por aire más seco del exterior de la cámara.

### **Posición de la secadora solar**

La posición de un secador solar depende de la incidencia de los rayos solares. Por ello, en primera instancia deben orientarse de norte a sur, para el caso de estudio del horno solar en el Taller Escuela PIMA (Programa Institucional de la Madera), el cual está ubicado en Managua Nicaragua pues el país se ubica en el Hemisferio Norte.

La caída o inclinación del techo, en el caso de Nicaragua, debe ser hacia el sur, de tal forma que se asegure la incidencia de los rayos solares lo más perpendicularmente posible, a lo largo del año. El grado de inclinación va a corresponder con la latitud del país. Para el caso de Nicaragua esa inclinación es de 10%. Esta inclinación permite que la variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares en las diferentes épocas del año, no afecte la eficiencia en la captación de la energía sobre el techo y el colector de la secadora.

### **Tamaño y capacidad del secador solar**

Cuando se diseña y construye una secadora solar, hay que considerar que el tamaño óptimo de la cámara está en función de la demanda de volumen de madera seca que requiere determinada industria.

La experiencia en Honduras indica que no es conveniente construir secadoras con capacidades superiores a los 15 m<sup>3</sup> (Benítez y Calderón, 1993), pues cuanto más grande sea la cámara menos eficiente es el secado.

Otro aspecto a considerar es el ancho de la secadora. El diseño debe garantizar una uniformidad en la circulación de la masa de aire a través de la pila de madera que se pretende secar. Es por ello que se recomienda que las secadoras no superen los 5 m de ancho (Benítez y Calderón,1993)

Una secadora que tenga 3.5 m de ancho y 3.5 m de largo con una altura máxima de 3 m permite apilar una carga de madera de 15 m<sup>3</sup> (Figura 5.2)



Figura 5: Secadora solar con capacidad máxima de 27 m<sup>3</sup> instalada en el  
Fuente: Programa Institucional de la madera (PIMA).

### **Sistema de aislamiento**

El objetivo del aislamiento del calor es lograr la máxima diferencia entre la temperatura interna de la cámara y la temperatura ambiental. Para ello, la selección de materiales para el techo y paredes es fundamental. La experiencia indica que la selección de materiales, debe garantizar que la diferencia mínima entre las temperaturas externas e internas sea de al menos de 10°C, según Benítez y Calderón (1993).

El techo debe construirse con un material transparente. Entre los que tienen esa propiedad, el vidrio es el que mejores resultados brinda. En el caso de las paredes, se puede usar madera, block, ladrillo, hierro galvanizado o esmaltado, etc.

Cuando la estructura de las paredes es construida con madera, hierro galvanizado o esmaltado, el aislante térmico interno es de vital importancia pues se requiere evitar la fuga de la temperatura. En el mercado el que mejores resultados brinda, por costo y calidad, es la fibra de vidrio flexible. Este material debe cubrir al máximo los espacios entre el forro interno y externo de la secadora (Figura 4). Por otra parte, es necesario asegurarse de que las puertas de acceso cuenten con un material aislante entre el marco y las paredes de la puerta y de las ventilas. En ambos casos se puede usar láminas de hule comercial.

### **componentes básicos del horno secador**

El diseño de una secadora solar debe incluir al menos cuatro componentes: techo, colector, ventiladores y ventilas. Cada uno de estos contribuye a asegurar un funcionamiento adecuado y garantiza la eficiencia y la calidad en el secado.

#### **Techo**

El techo de una secadora solar es un componente que requiere de gran atención, ya que es precisamente a través de él que se capta la energía solar que calentará el aire interno de la cámara, el cual es el responsable del secado de la madera. Para su construcción se puede utilizar vidrio o láminas transparentes; dando mejores resultados el vidrio. La energía solar pasa a través del vidrio utilizando la onda corta y una vez que lo atraviesa la energía no puede escapar ya que se refleja en forma de onda larga, la cual queda atrapada en la cámara y produce un efecto invernadero a lo interno de la cámara.

#### **Colector**

El colector debe ubicarse entre el techo y la pila de madera. La función de este componente es capturar la energía solar, la cual se transforma en calor y se transmite al aire, lo que produce que este se caliente. Además, la presencia del

colector impide que los rayos del sol incidan directamente sobre la madera que se pretende secar, evitándole daños a la superficie como las grietas y la decoloración. Los colectores pueden construirse con láminas de zinc, corrugadas o lisas, pero este tipo de material por su espesor se enfría rápidamente en ausencia de los rayos solares. Debido a esto es mejor utilizar una lámina de hierro pintada en color negro mate de al menos 3 mm de espesor. El espesor de la lámina, combinado con su color negro mate, permite aprovechar al máximo la energía solar capturada.

### **Ventiladores**

La energía solar capturada en el colector debe ponerse en movimiento a lo interno de la secadora, a fin de que ese aire caliente circule entre la pila de madera que se va a secar. Ese movimiento debe ser propiciado por ventiladores que se colocan dentro de la cámara de secado. El aire caliente que circula entre la pila de madera, absorbe la humedad contenida en la madera y es por ello que se produce el secado.

El tamaño de las aspas y la capacidad del motor de los ventiladores, depende básicamente de la cantidad de madera que se va a secar. Esto significa que tendrán que instalarse la cantidad de ventiladores necesarios para que haya un movimiento uniforme de la masa de aire interna, a través de la pila de madera.

La velocidad promedio del aire a través de la pila de madera que se seca debe estar entre 1.0 y 2.0 m/s, (Benítez y Calderón, 1993). Si se tiene una velocidad más baja, el secado no es eficiente y si la velocidad es más alta, se pueden causar daños severos a la madera, como reventaduras e incluso grietas.

Idealmente, se deberían instalar abanicos que puedan invertir el giro para así permitir circulación de aire en determinado momento por ambos costados de la pila de madera. Se promueve con ello una homogeneidad del contenido de humedad final de ésta en proceso de secado.

## **Ventilas**

El aire caliente que circula a través de la pila de madera recoge la humedad que hay contenida en la madera, esa humedad llega a saturar el aire caliente y eleva la humedad relativa a lo interno de la secadora. Cuando esto ocurre, el secado se estanca y si esa humedad no se saca de la secadora se corre el riesgo de que el proceso de secado se detenga, e incluso, que la humedad retorne a la madera. Para evitar esto, el diseño de la secadora debe contemplar la existencia de ventilas o ventanas que se ubiquen en las paredes y que permitan aperturas controladas para que se dé intercambio entre la humedad ambiental fuera de la cámara y la interna. Estas ventilas sólo se abren cuando la humedad relativa interna de la cámara es más alta que la externa. Debido al movimiento del aire que producen los ventiladores y la presión interna y externa a la cámara, una porción del aire caliente y cargado de humedad sale y otra porción menos húmeda y más fría entra para sustituir el aire que sale.

Con este procedimiento se asegura bajar la humedad relativa interna del aire de la cámara, pero también se sacrifica un poco de temperatura a lo interno de ésta. La saturación de humedad del aire interno a la cámara se intensifica durante las noches, cuando el aire es más frío. El momento idóneo para abrir las ventilas es bien temprano en las mañanas, cuando aún el sol no ha calentado lo suficiente el aire interno de la cámara. De esa manera la pérdida de temperatura es mínima.

## **Materiales de construcción**

Las características primordiales de los materiales para construir la secadora no son diferentes a los requeridos para cualquier otro tipo de construcción. Se busca que el material esté disponible cerca del lugar de construcción para disminuir el costo de traslado. Además, se espera que ese material sea del menor costo posible.

La principal característica de los materiales de construcción es que deben mantener el calor a lo interno de la cámara de secado, se busca que éstos aseguren un aislamiento térmico adecuado y que sean de larga duración.

## **Cimientos**

La estructura de la secadora debe montarse sobre un cimiento que asegure aislamiento de temperatura y humedad proveniente del suelo. Aunque el área mínima de cimiento que debe existir en la secadora es la misma área de la secadora solar, se sugiere que se incluya un área de preapilado que sea de un área al menos igual al área de la secadora.

La calidad del concreto a utilizar para asegurar el soporte a la secadora, y la circulación de la maquinaria pesada (tractor, montacargas, entre otros), debe ser de  $210 \text{ kg/cm}^2$  de resistencia mínima al esfuerzo.

## **Paredes de puertas y ventanas**

Para la construcción de paredes, puertas y ventanas se sugiere que se utilice la madera como estructura principal. Como forro externo e interno, se recomienda el hierro galvanizado número 26, que está ampliamente disponible en el mercado nacional. Si se quieren acabados más estéticos, se puede usar lámina corrugada como forro externo y lámina lisa como forro interno. También se puede usar el hierro esmaltado número 26, aunque el costo de este es mayor; pero este último tipo de material tiene la ventaja de que no se corroe o herrumbra como el galvanizado.

El aislante térmico es indispensable en estos casos, por lo que se sugiere el uso de fibra de vidrio flexible (lana de fibra de vidrio). Este material debe cubrir todo el espacio que hay entre los forros internos y externos.

Este material se consigue en el mercado nacional con facilidad y está disponible en diferentes espesores según sean las necesidades o especificaciones técnicas del secador a construir.

## **Techo**

A continuación se brinda un análisis de ventajas y desventajas de los diferentes tipos de materiales para construir el techo de una secadora solar. Materiales usados en la construcción de techo de secadoras solares.

Entre todos estos materiales, el más recomendable para construir el techo es el vidrio. Sin embargo, al instalarlo debe realizarse con cuidado y precisión para

evitar que se quiebre. Además, debe sellarse muy bien las juntas o uniones, utilizando materiales como la silicona, para evitar filtraciones de agua. Para un mejor manejo se recomienda que el techo se coloque en cuadros de  $0.80 \text{ m}^2$  y utilizando vidrios de 4 mm de espesor.

### **Colector**

Aunque el colector solar se puede construir con hierro galvanizado, para mejores rendimientos se sugiere la lámina de hierro de 3 a 4 mm de espesor pintada en color negro mate. Este colector debe cubrir toda el área en donde se pretende apilar la madera que se va a secar.

### **Ventiladores**

Para secadoras solares cuya área interna en la cámara sea de 3.5 m x 3.5 m, se sugiere la instalación de dos ventiladores con aspas que tengan un diámetro de 45 cm, 1700 rpm, con motor de 0.33 Hp y para conectar en 110 ó 220 voltios, según voltaje disponible. Es deseable que se pueda conseguir en el mercado motores que permitan doble giro para dar movimiento de la masa de aire en ambos costados de la pila de madera.

### **Modelo construido de secado solar de madera**

A continuación, se presenta el modelo de secadora construido en el Programa Institucional de la Madera (PIMA) Ubicado en el Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios. El cual puede sirvió de guía para el desarrollo de este trabajo monográfico, además puede servir para la construcción de secadoras solares que se adapten según la necesidad y recursos financieros disponibles.

Este modelo fue diseñado por el Ingeniero Jhader Exequiel Zuniga Guillen, financiado por vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería, como parte de la primera corte de investigadores de la UNI-VID 2018.

A continuación, se presentan los planos e imágenes que ejemplifican las características del secador solar construido en el Programa Institucional de la madera en cuanto a:

## Cimientos

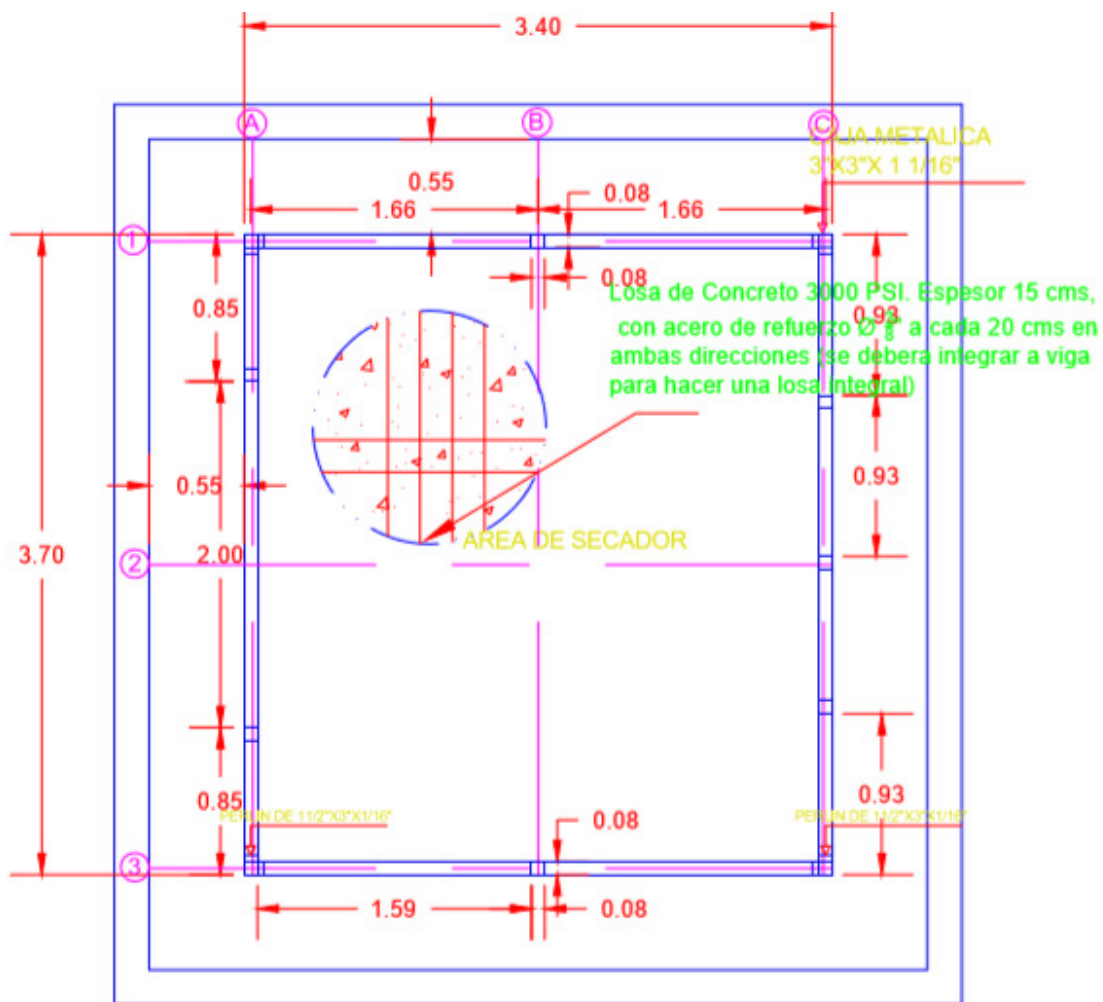


Figura 6: Vista de Cimentación del horno, Fuente: PIMA



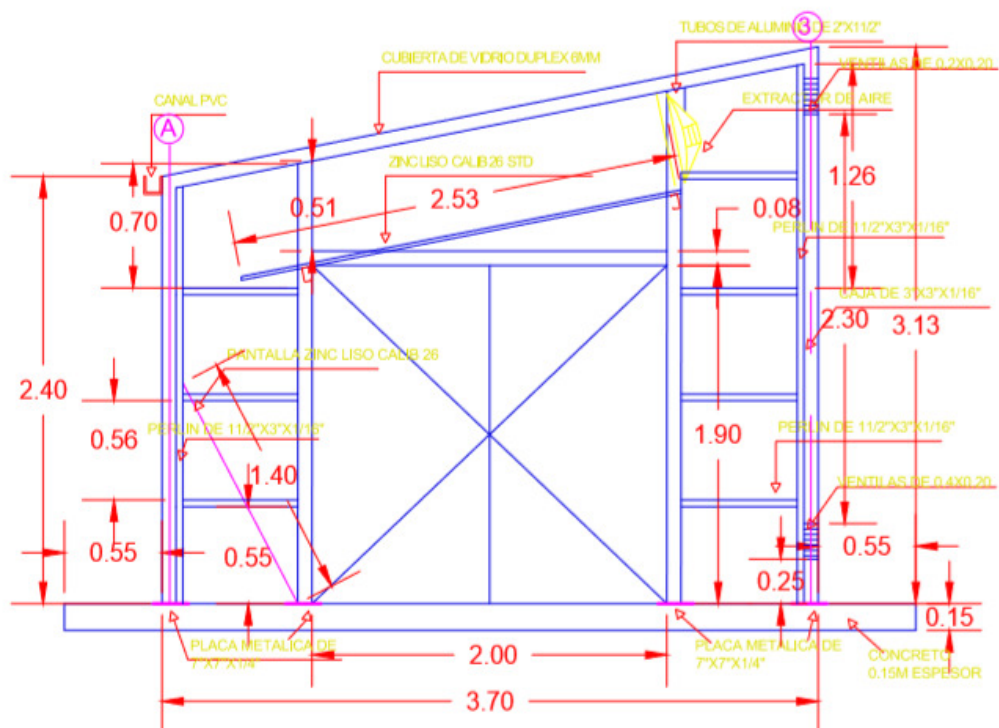


Figura 7: Elevación estructural lado A, Fuente: PIMA.

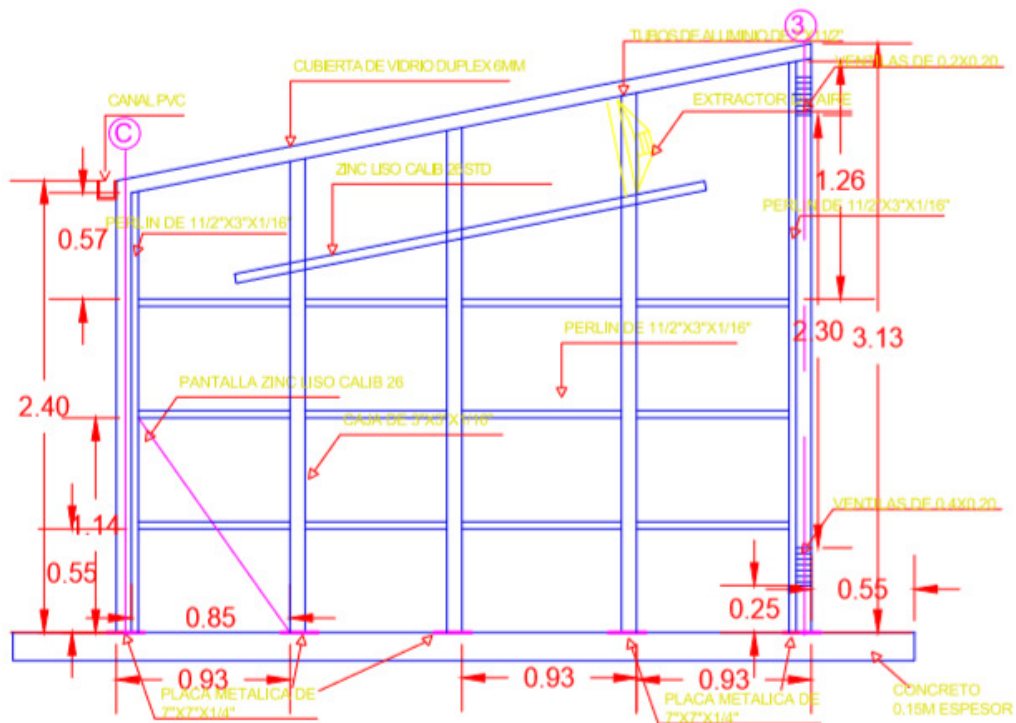


Figura 8: Elevación estructural lado B, Fuente: PIMA.

Consiste en la conformación de la viga de fundación de 4 elementos, a la cual se introducen los bastones debidamente alineados con una lienza. Estos bastones son de varillas corrugadas de 3/8" en forma de "L" y se colocan 30 cm. traslapados a los estribos de la viga de fundación y 40 cm. sobresaliendo por encima de la misma, resultando así una longitud total de 80cm. armado

Los bastones de anclajes se colocan con una separación de 40cm. entre ellos y de forma alternada a lo largo de todo el perímetro donde se ensamblaran las paredes. En el caso de las losas de cimentación, se dejan las mismas varillas alternadas en todo el perímetro donde se colocaran los paneles. Si se trata de una losa existente solamente taladramos y espichamos los bastones, reforzándolos con algún pegamento epoxico y que sobresalgan 40 cm. sobre el nivel de la losa y dejando siempre la separación entre estos a cada 40 cm. y alternados perimetralmente.

Luego de colocar los paneles en una superficie horizontal, se marcan y se cortan según las dimensiones de los ejes a construir, se sugiere ir enumerando las piezas según se vayan cortando. Una vez amarrados los paneles y reforzados con sus respectivos accesorios, se procede a ensamblarlos sobre los bastones de anclaje de manera que estos queden necesariamente entre el poliestireno y la malla electrosoldada. Se recomienda cortar o quemar parcialmente el poliestireno que quedara alrededor de las varillas de anclaje para propiciar una mejor adherencia del mortero de repello.

La unión de paneles se realiza amarrándolos a cada 15 cm. y reforzando esta unión con una malla plana de 8"X8' colocada en ambas caras del panel y amarrada o engrapada a cada 30 cm. Este procedimiento deberá realizarse tanto si se desea dar más longitud a las paredes como si desea brindar mayor altura a las mismas. En las uniones ortogonales entre paneles se deberán amarrar los mismos igualmente a cada 15 cm. y luego se reforzaran con una malla esquinera de 12"X8' que se colocara tanto en la cara interna como en la externa de la esquina amarrada o engrapada a los paneles a cada 30cm.

En el caso del armado de las losas de techo o entrepiso, los paneles se amarran de forma cuatropeada a cada 15 cm reforzando esta unión con malla plana de 8"X8' a cada 30 cm. La colocación debida de los paneles será con la cercha en sentido perpendicular al claro más largo existente. El apuntalamiento metálico o de madera se colocara a una distancia máxima de 1mt. X1mt. Es necesario verificar las contra flechas antes de colar el concreto a la losa. Las uniones de las losas a los muros se hace con las mallas esquineras en la cara interna y externa de la misma. Finalmente se colocan las varillas de refuerzo en la parte posterior los paneles y en el mismo sentido de la cercha, quedando en dependencia del claro existente la dimensión y la distancia entre las varillas.

### **Refuerzos en boquetes de puertas y ventanas:**

Los boquetes de puertas y ventanas se marcan y se cortan con un alicate o disco. Luego este corte del panel se refuerza con malla zigzag de 3"X8' en todo el perímetro del boquete tanto en la cara interna como en la externa y en el canto del mismo, la malla Zigzag deberá traslaparse 30 cm entre si y este traslape se reforzara con una pieza de 40 cm a 45 grados. Para lograr una mejor fijación del marco de la puerta o de la ventana se deberá retirar 5 cm. de poliestireno alrededor del boquete el cual y se rellenara con mortero de 2000 psi.

### **Alineación y aplomado de los paneles:**

Una vez ensamblados los paneles, estos se deberán alinear y aplomar verticalmente con cuartones de madera o piezas de metal.

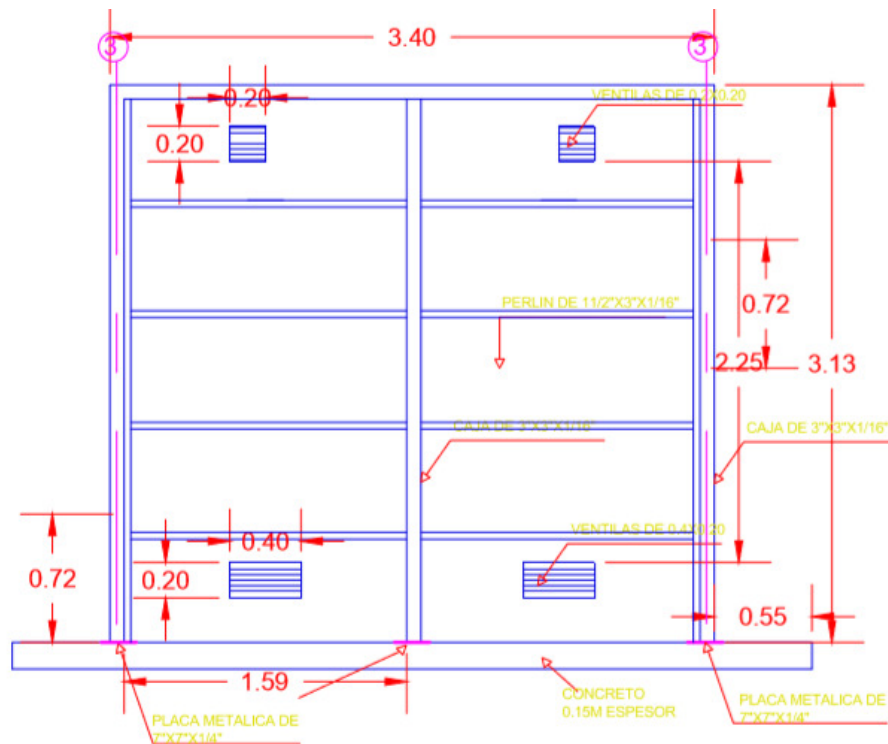


Figura 8.1 Elevación estructural vista trasera, Fuente: PIMA.

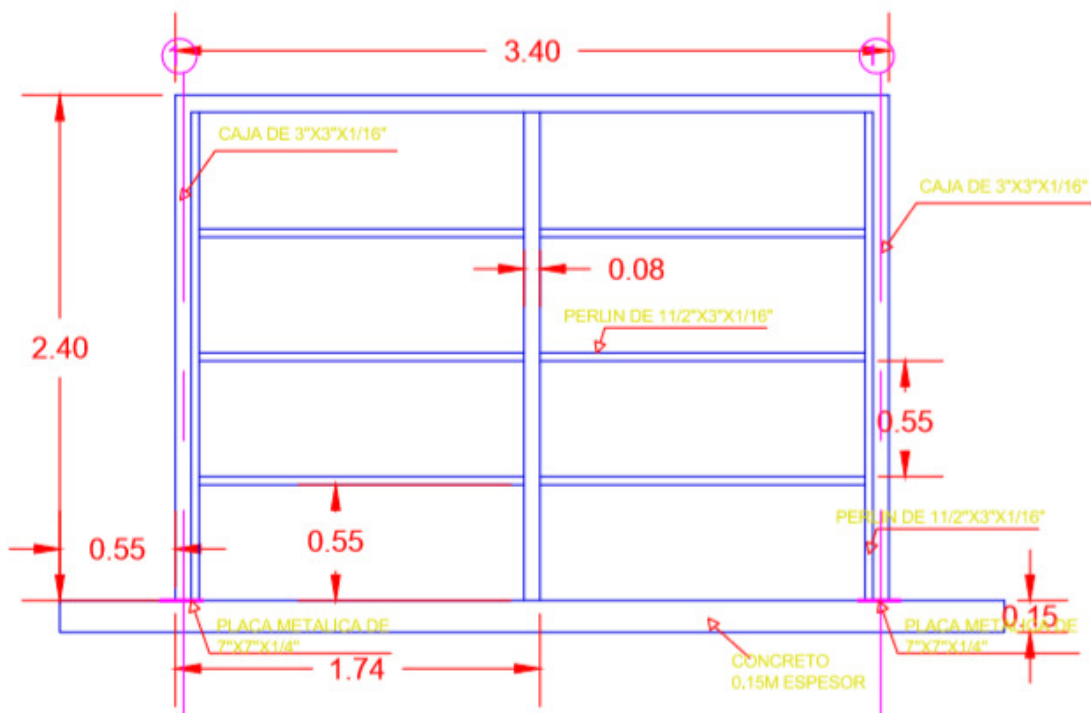


Figura 8.2 Elevación estructural vista frontal, Fuente: PIMA.

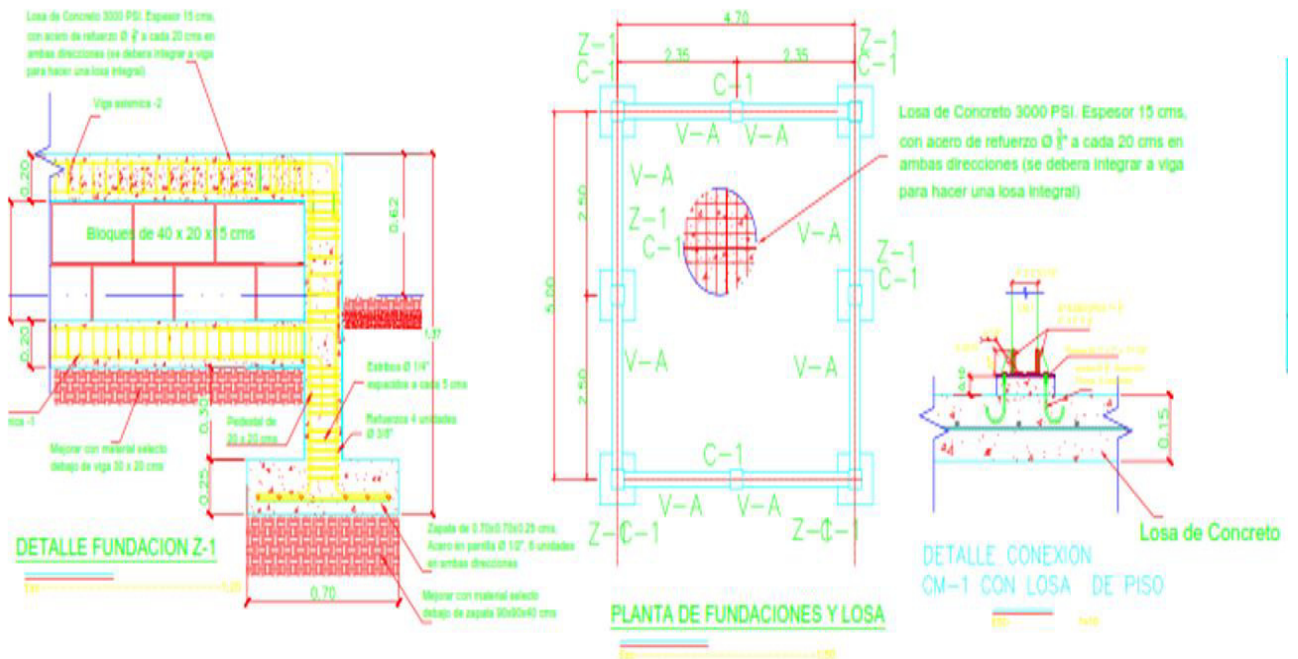


Figura 8.3: Sección de columnas y vigas, Fuente: PIMA.

## Techo



Figura 8.4: Vista superior del techo, Fuente: PIMA.





Figura 8.5: Vista superior del techo instalado, Fuente: PIMA.



Figura 8.6: Vista del horno con muro de retención perimetral, Fuente: PIMA.

## **Construcción del Horno para secado de madera**

Una vez realizado el diseño se procedió a construir un prototipo del horno solar con funcionamiento solar, se tomó en cuenta la ubicación y orientación del secador, de manera que los rayos solares no sean obstaculizados y penetren en el techo de la cámara de secado con la mayor perpendicularidad posible, para ello fue necesario ubicar el secador de Norte a Sur y con una inclinación del techo de 12° que correspondió a la latitud de la zona; Empleando los materiales propuestos en la etapa de diseño para el correcto funcionamiento de la cámara de secado.

El horno se construyó frente al edificio tipo UNAN lugar en el cual está ubicado el Programa Institucional de la madera, en el Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios.

### **Ensayos para análisis de funcionamiento.**

El horno prototipo que se construyó en el Programa Institucional de la madera (PIMA) Universidad Nacional de Ingeniería, sirvió para analizar las variables: humedad, temperatura y tiempo; involucradas en el proceso de secado de madera.

Inicialmente se realizó un ensayo que consistió en la operación del horno en vacío, se utilizó un termómetro para medir el cambio de temperatura en diferentes horas del día dentro y fuera de la cámara de secado. Los datos obtenidos fueron analizados utilizando la herramienta Microsoft Excel 2013, identificando las temperaturas máxima y mínima registradas.

Posteriormente se cargó el horno prototipo a su máxima capacidad de operación, con el objeto de obtener resultados reales del secado de madera en el mismo, utilizando un termómetro para medir los cambios de temperatura dentro de la cámara.

Después de que se secó la carga de madera, se cortaron 3 muestras de 1"x1" de sección transversal y 12" [8] de longitud de cada una de las especies para su posterior análisis a como se muestra en la figura 3, se utilizó un termómetro para medir los cambios de temperatura dentro de la cámara de secado, también se utilizó

un higrómetro para medir la humedad de la madera y una balanza de reloj para determinar el peso de las muestras antes y después del secado.



Figura 9: Muestras de madera de Pino, Cedro Real y Guapinol respectivamente enumeradas, utilizadas durante los ensayos experimentales en el horno prototipo.

### **análisis de resultados.**

Posterior a la etapa de ensayos se procedió al análisis de los resultados obtenidos, haciendo uso del software Microsoft Excel 2013, para la tabulación de los datos recopilados y realizar graficas que nos permitan ver el comportamiento de las principales variables involucradas en el proceso de secado de madera. Así como también observar valores máximos y mínimos alcanzados durante la operación del horno prototipo.

Uno de las variables de mayor interés es la temperatura interna del horno. En la figura 6 se puede observar los cambios de temperatura promedio dentro de la cámara de secado del horno prototipo en vacío para un periodo de 24 horas. Alcanzando una temperatura máxima de 101 grados Celsius aproximadamente a las 2 pm y una temperatura mínima de 40 grados Celsius a las 5 am. Estos datos se recolectaron al promediar los resultados durante un periodo de 30 días.





Figura 9.1: Resultados obtenidos de las muestras de madera utilizadas durante los ensayos de funcionamiento en el horno prototipo en vacío. Elaboración propia.

En la tabla 1 se puede observar los datos recolectados de las muestras de madera resultantes de los ensayos en el horno prototipo que se construyó en la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua, reflejando valores como humedad relativa de la madera verde y seca, así como los tiempos de secado para cada una de las especies que se analizó.

Especie de Madera	Humedad de madera verde (%).	Humedad de madera seca (%).	Tiempo de Secado (días).
<b>Pino Común</b>	70	10	10
<b>Cedro Real.</b>	40	12	12
<b>Guapinol</b>	45	10	23

Figura 9.2 Resultados obtenidos de las muestras de madera utilizadas durante los ensayos de funcionamiento en el horno prototipo, Elaboración propia.

## Hipótesis

- Con la Implementación del horno propuesto, se mejorará la calidad de la madera procesada.

## **Variables físicas inmersas en el proceso de secado**

### **Temperatura**

Este tipo de energía da mayor o menor movilidad a las moléculas de agua, pero si éste movimiento es muy rápido debido a fluctuaciones severas en la temperatura, la madera tenderá a deformarse. Para cada tipo de madera pues existe estrecha relación con la humedad del aire y por tanto se detallará como se debe medir la temperatura en función de la humedad.

### **Humedad relativa del aire**

Para el control del secado es importante medir la humedad relativa del aire, pero dependiente de la temperatura, ésta relación se la consigue con un instrumento denominado psicrómetro y con la ayuda de las cartas psicométricas. Este instrumento consta de dos termómetros, el primero de bulbo seco medirá la temperatura real del horno de secado y el segundo de bulbo húmedo estará rodeado por un tejido especial, que transmite la humedad desde un recipiente con agua destilada hacia el bulbo, haciendo que éste se encuentre a menor temperatura, en relación al de bulbo seco; el efecto es producido por la evaporación.

## **Diseño metodológico**

### **Tipo de Investigación/Universo/Muestra**

#### **El universo**

El universo de la presente investigación, serán pymes del sector madera mueble en el Municipio de Managua, que utilizan la madera como materia prima y que no cuentan con un sistema de secado apropiado que contribuya al mejoramiento en la calidad en sus productos.

#### **La muestra**

Representativa del universo de estudio será la Facultad de Tecnología de la Industria y el Programa Institucional de la Madera, que trabajan en conjunto en búsqueda de una alternativa, para el fortalecimiento de Pymes del sector madera mueble en Managua.

#### **Variables a investigar**

Las variables a medir son temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad del aire (m/s), peso de la muestra (lbs.) y tiempo de secado (horas/días). Se utilizará el método de observación participante para conocer el proceso de secado, la fase de experimentación consistirá en lo siguiente: se tomará una determinada cantidad de madera con características similares (grueso, ancho, largo y especie y humedad inicial) y se colocará en el Horno solar para el secado de la madera, construido para realizar las pruebas; se procederá a realizar pruebas según programación.

#### **Recopilación de información de fuentes secundarias.**

Se realizará consulta bibliográfica y expertos, sobre horno secadores de madera que funcionan a base de fuente energéticas solar en la región, además de la información respecto a la existencia de diferentes materiales en el mercado nacional, para optimizar las dimensiones y costos que requiera este proyecto.

## **Levantamiento de información primaria.**

Se realizará la recolección de datos por diferentes instrumentos a utilizar como: Termómetros, para medir la temperatura dentro de la cámara de secado y compararla con la temperatura del ambiente. Balanzas de reloj, para pesar la muestra en libras de las piezas de madera que entran y salen de la cámara de secado. Higrómetro, será empleado para medir la humedad dentro y fuera de la cámara de secado. Calculadora, para realizar los cálculos matemáticos. Reloj, será utilizado para medir el tiempo en el que ocurren los cambios.

También, se utilizarán formatos en cada una de las pruebas para llevar una bitácora de los cambios ocurridos en cada periodo de tiempo, Hojas de toma de datos, utilizadas para registrar los datos de las variables a medir tanto dentro, como fuera de la cámara de secado. Cámara fotográfica, se utilizará como herramienta para evidenciar y sistematizar el proceso de montaje y periodo de operación del horno solar

## **Construcción del Horno Solar.**

Una vez realizado el diseño se procederá a construir el horno solar con una capacidad de 3m<sup>3</sup> de madera, tomando en cuenta la ubicación y orientación del secador, de manera que los rayos solares no sean obstaculizados y penetren en el techo de la cámara de secado con la mayor perpendicularidad posible, para ello será necesario ubicar el secador de Norte a Sur y con una inclinación del techo de 12° que corresponde a la latitud de la zona.

El horno solar será construido utilizando los materiales que serán propuestos en la etapa de diseño para el correcto funcionamiento de la cámara de secado.

La primera etapa para la ejecución de la obra es la construcción de las bases de concreto, esta es de gran importancia porque es sobre la misma que se concentrará el peso de las diferentes partes del horno, la carga de madera a secar y cargas adicionales que se presenten.

Posterior a la etapa de construcción de las bases de concreto se ejecutara la construcción del horno solar, levantando las paredes especiales con material aislante en su interior cuya función es mantener una diferencia de calor entre la cámara de secado y el medio exterior, que deberán ser capaces de soportar los fuertes vientos, lluvias y demás fenómenos climatológicos que podrían presentarse.

### **Ubicación del horno dentro del recinto.**

En la primera etapa se propone un diseño de acuerdo a las condiciones presentes en el lugar de construcción; Para este proyecto las condiciones dentro del recinto podrían variar según la localización exacta donde se ejecutara la construcción del horno solar, por ejemplo una zona donde los arboles obstaculicen el ingreso de los rayos solares al techo del horno solar en determinada hora del día no es un lugar adecuado para la construcción del mismo, debido a que la eficiencia disminuirá significativamente.

### **Procesamiento de información**

Para el análisis y procesamiento de datos se implementarán los siguientes programas: Excel 2013 (Estadística descriptiva y gráficos). Una vez construido el horno, estas herramientas se utilizaran en el periodo de operación del horno, para registrar el comportamiento de las variables (temperatura, humedad relativa, en una época del año específica, tiempo, humedad de la madera), para comparar las variables se realizaran tablas donde se ingresara la información de cada según la programación de pruebas. Los programas computarizados a utilizar para sistematizar los datos serán los siguientes: Para elaborar el documento escrito se utilizará Word 2013, se pretende que el análisis de los gráficos y tablas obtenidos con la aplicación de Excel y provean datos que puedan ser analizados y luego documentar la información correspondiente. Además, se realizaran los planos de planta, detalles de fundición y vistas arquitectónicas de la estructura a construir, los planos en 2D se elaboraran con

ayuda de la herramienta Autocad 2015, y con la herramienta Revit 2015 para planos 3D y la simulación del proceso del horno solar.

## Conclusiones

- ✓ La construcción de un horno solar para el secado de madera, pretende proveer una alternativa que contribuya al fortalecimiento de la cadena de valor del sector madera mueble en Nicaragua, dándole mejor calidad a la madera en sí y los productos terminados, haciendo esto de forma amigable con el medio ambiente y muy eficiente dado que los costos se enfocan básicamente a la instalación del mismo. Al no utilizar ningún tipo de combustible para su funcionamiento el horno solar se convierte en una opción amigable con el medio ambiente para el secado de madera.
- ✓ El diseño propuesto en el desarrollo de este proyecto investigativo es económico en su construcción y de fácil acceso a los materiales para su ejecución, disponibles en el mercado nacional.
- ✓ Las paredes del horno son las encargadas de evitar el flujo del calor acumulado durante el día en la cámara de secado hacia el exterior del horno solar, dado que sus interiores poseen fibra de vidrio como aislante térmico por su baja conductividad térmica.
- ✓ El horno prototipo que se construyó en la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua ha dado datos importantes y positivos para el desarrollo del horno solar a escala natural. Los tiempos de secado de las especies de madera analizados durante los ensayos experimentales son Finalmente se espera que este proyecto se desarrolle en las pequeñas y medianas empresas del sector madera del municipio de Managua luego se expanda a todo del país, dando así una solución limpia al problema del secado de madera y los defectos en la misma evitando así pérdidas económicas resultantes de un mal proceso de secado.
- ✓ Comprobar utilizar la técnicas de secado solar ya que en los países tropicales debido a la caracterización de su clima resulta ser una gran ventaja desde el punto de vista de inversión inicial además en la etapa de operación los costos son menores debido alternativa de consumo energético

## Recomendaciones

- ✓ Antes de efectuar la inversión en la construcción de una secadora solar es importante que se evalúen las necesidades de materia prima, con el fin de construir la secadora según las necesidades óptimas del usuario.
- ✓ Al diseñar y construir una secadora solar, el aislamiento térmico es de vital importancia para asegurar la calidad de la secadora.
- ✓ Si se comparan los costos del secado en horno convencional con el de secadora solar, esta última ofrece la ventaja de tener una inversión inicial relativamente baja. La inversión de instalar un horno convencional podría superar en un 85,5%, la inversión de construir una secadora solar.
- ✓ El uso de secadoras solares de madera es una tecnología de muy bajo costo, con utilización de una energía renovable muy abundante en los países tropicales como por lo que su implementación sería una alternativa de muy buena utilidad en las industrias forestales.

## Referencias bibliográficas

- [1] Alberto D. (1998). Secado de la Madera. Cuaderno de dasonomía, 3-5p.
- [2] Néstor M. (Febrero 2006). Secado al aire. Url: [http://webdelprofesor.ula.ve/forestal/moranest/pagina\\_personal/presentaciones/secado\\_2.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/forestal/moranest/pagina_personal/presentaciones/secado_2.pdf).
- [3] Loida G., Jairo E., Daysi R. (Agosto 2003). Manual para el participante, Tecnología de la madera y materiales. 34p.
- [4] Nyle. (Diciembre 2006). Introducción de Secado al Horno. Url: [http://www.nyle.com/downloads/KilnDrying\\_ES.pdf](http://www.nyle.com/downloads/KilnDrying_ES.pdf). 8p.
- [5] Definiciones abc. (Junio 2007). Definición de radiación solar. Url: <http://www.definicionabc.com/ciencia/radiacion-solar.php>.
- [6] Plumtre R., Jayanetti D. (1996). "Solar Heated Timber Drying Kilns". A manual on their desing and operation. TRADA-ODA, U.K.
- [7] Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 5 (14), 2008, Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Forestal Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI).
- [8] Silverio V. (1998). Guía para el Secado de la Madera en Hornos, Bolivia. Chemonics International, USAID. 18p.
- [9] Amarilis B. (2005). Guia para el Secado de la Madera en Hornos Convencionales. Santa Fe. ETSUFOR. 7p.
- [10] Eumetcal. (Mayo 2003). Concepto de onda corta, Url: <http://www.eumetcal.org/euromet/spanish/nwp/n5720/n5720004.htm>. (Accesado junio de 2016).
- [11] Yonus C. (2007). Termodinámica, 7ma Ed. México. McGraw-Hill. 281p.
- [12] Yonus C. (2007). Transferencia de Calor y Masa, México. McGraw-Hill. 20p.



[13] EcuRed. (Enero de 2013). Que es un pirómetro, Url: <http://www.ecured.cu/Pir%C3%B3metro>. (Accesado junio de 2016).

[14] Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Diciembre 2008), Url: <http://ineter.gob.ni/>. (Accesado Mayo de 2016).

## Anexos



Figura 10: Detalle del descapote, nivelación y zanqueo de la cimentación horno PIMA.



Figura 10.1: Detalle de las zapatas, vigas, llorones y malla sísmica del horno PIMA.





Figura 10.2: Detalle de muro de concreto reforzado y anclajes para horno PIMA.



Figura 10.3: Montaje de anclaje para horno PIMA.



Figura 10.4: Técnica de dimensionamiento en laminas ISOPANEL-HOPSA.



Figura 10.5: Instalación de canaletas sobre para lamina ISOPANEL-HOPSA.





Figura 10.6: Corte de lámina ISOPANEL-HOPSA en las instalaciones PIMA.



Figura 10.7: Detalle colocación de pegamento Sikaflex en juntas y fijación con tornillo punta de mosca 7/16 punta fina.

---